

## Многоконтурные автоматические системы регулирования с несколькими регулирующими воздействиями и их применение для поддержания температуры пара прямоточных котлов

Биленко В.А., канд. техн. наук

ЗАО «Интеравтоматика»<sup>1</sup>

Рассмотрен класс многоконтурных автоматических систем регулирования (АСР), в которых для поддержания основной регулируемой величины применяется несколько регулирующих воздействий. Показана возможность использования при анализе и синтезе таких систем методов, разработанных для хорошо известных многоконтурных структур с несколькими регулируемыми переменными. Доказано, что в многоконтурных АСР с несколькими регулирующими воздействиями, включающих в себя локальные АСР с несколькими регулируемыми переменными, имеется возможность частотной развязки инерционных контуров, разделенных малоинерционным опережающим контуром. Проведено исследование многоконтурной АСР температуры пара прямоточного котла. Изложены особенности реализации подобных структур с учетом конструктивных особенностей котельного оборудования и современных требований организации технологических режимов.

В большинстве публикаций, посвященных проблемам анализа и синтеза многоконтурных автоматических систем регулирования энергоблоков (например, [1—4]), обычно рассматриваются многоконтурные, чаще всего двухконтурные, локальные АСР инерционных параметров. В этих АСР дополнительно с основной регулируемой величиной используются сигналы по опережающим регулируемым величинам, обладающим более благоприятными динамическими свойствами при возмущении регулирующим органом АСР. В то же время в тепловой энергетике применяется и другой класс многоконтурных, в частности двухконтурных, АСР, в которых для поддержания основной регулируемой переменной используются два (если речь идет о двухконтурных системах) регулирующих воздействия. При этом одно регулирующее воздействие с более благоприятными динамическими характеристиками влияния на регулируемую величину служит для непосредственного ее регулирования, а второе — для ввода в диапазон регулирования первого из них. В качестве регулируемой величины второго контура используется или непосредственно положение первого регулирующего органа, или технологический параметр, характеризующий значение регулирующего воздействия.

Простой пример таких систем — АСР температуры пара промежуточного перегрева, в которой собственно регулирование температуры осуществляется воздействием на клапан аварийного впрыска, а поддержание

диапазона его регулирования производится изменением производительности дымососа (или дымососов) рециркуляции. Самый типовой, но более сложный случай — это регулирование температуры свежего пара прямоточного котла путем воздействия на клапаны впрысков, оптимальное положение которых поддерживается клапанами предыдущих впрысков, а первого из них по тракту котла — изменением соотношения «вода — топливо» [5].

### Структурные схемы многоконтурных АСР

Для удобства анализ динамических свойств многоконтурных АСР с несколькими регулирующими воздействиями проводится путем сопоставления с динамикой многоконтурных АСР с несколькими регулируемыми величинами (для простоты на примере двухконтурных АСР). В качестве аналога используется каскадная двухконтурная АСР (рис. 1) с корректирующим  $[W_{кор}(s)]$  и стабилизирующим  $[W_p(s)]$  регуляторами. При этом объект регулирования представляется следующими двумя возможными способами [4]:

последовательным соединением опережающего  $[W_{оп}(s)]$  и инерционного  $[W_{ин}(s)]$  участков (рис. 1, а);

с опережающим и главным  $[W_{гл}(s)]$  участками (рис. 1, б), связывающими между собой внутренние координаты двухконтурной АСР: главную  $\sigma_{гл}$  и опережающую  $\sigma_{оп}$  регулируемые величины и регулирующее воздействие  $\mu$ , причем

$$W_{гл}(s) = W_{оп}(s)W_{ин}(s).$$

<sup>1</sup>115280, Москва, Автозаводская ул., д. 14/23. ЗАО «Интеравтоматика».

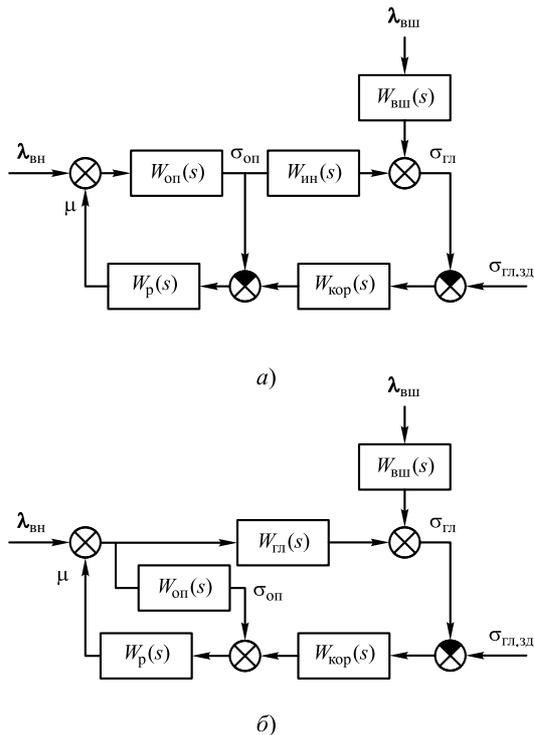


Рис. 1. Структурные схемы двухконтурных АСР с двумя регулируемыми переменными

На рис. 1, а и б представлены внешние координаты АСР: задающий сигнал ( $\sigma_{\text{гл.зд}}$ ), внутреннее ( $\lambda_{\text{вн}}$ ) и внешнее ( $\lambda_{\text{вш}}$ ) возмущения, а также передаточная функция канала действия внешнего возмущения  $W_{\text{вш}}(s)$ .

Такое представление объекта двухконтурного регулирования, как на рис. 1, а, обычно применяется в тех случаях, когда технологически можно выделить участок регулирования, входом которого является  $\sigma_{\text{оп}}$ , а выходом —  $\sigma_{\text{гл}}$  и обе регулируемые величины физически однородны. В качестве примера можно привести регулирование температуры пара, где  $\sigma_{\text{оп}}$  — температура пара за впрыскивающим парохладителем (впрыском), а  $\sigma_{\text{гл}}$  — температура на выходе пароперегревателя. Структурная схема, представленная на рис. 1, б, более полно отражает свойства объекта двухконтурного регулирования при физически разнородных и менее связанных между собой  $\sigma_{\text{оп}}$  и  $\sigma_{\text{гл}}$ .

Наряду с каскадной структурой широко применяется и другой вариант построения двухконтурной АСР с двумя регулируемыми переменными. Это схема с опережающим скоростным сигналом или схема с дифференциатором [1—4]. Сравнительный анализ динамических свойств двух вариантов выполнен в [3]. Выбор каскадной структуры в качестве аналога для исследо-

вания многоконтурных АСР с несколькими регулирующими воздействиями обусловлен тем, что для систем данного типа схема с опережающим скоростным сигналом своего аналога не имеет.

На рис. 2 представлены структурные схемы двухконтурной АСР с двумя регулирующими воздействиями. Для регулирования основной регулируемой величины  $\sigma_{\text{гл}}$  используются два регулирующих воздействия: малоинерционное  $\mu_1$ , формируемое регулятором  $W_{\text{р1}}(s)$ , и более инерционное —  $\mu_2$ , формируемое регулятором  $W_{\text{р2}}(s)$  и обеспечивающее ввод в диапазон регулирования воздействия  $\mu_1$ . Таким образом, АСР включает в себя два регулятора:  $W_{\text{р1}}(s)$ , выполняющий задачу поддержания  $\sigma_{\text{гл}}$  воздействием на  $\mu_1$ , и  $W_{\text{р2}}(s)$ , поддерживающий заданное значение регулирующего воздействия  $\mu_1$  путем изменения  $\mu_2$ . В качестве показателя регулирующего воздействия  $\mu_1$  используется или положение регулирующего органа, или значение технологического параметра, характеризующего это воздействие. К внешним координатам АСР по сравнению с рис. 1 здесь добавлены два типа внутренних возмущений: по каналу  $\mu_1$  —  $\lambda_{\text{вн1}}$  и по каналу  $\mu_2$  —  $\lambda_{\text{вн2}}$ , а также задающий сигнал положения  $\mu_1$  —  $\mu_{1\text{зд}}$ .

Участок воздействия  $\mu_1$  на  $\sigma_{\text{гл}}$ , обозначенный как  $W_{\text{об1}}(s)$  и являющийся объектом регулирования менее инерционного контура с регулятором  $W_{\text{р1}}(s)$ , представляет собой (будет показано далее) аналог опережающего участка  $W_{\text{оп}}(s)$  в двухконтурной схеме с двумя регулируемыми переменными (см. рис. 1). Что касается канала, связывающего с основной регулируемой величиной  $\sigma_{\text{гл}}$  второе регулирующее воздействие  $\mu_2$ , то здесь следует выделить два возможных случая. В первом из них (см. рис. 2, а) канал воздействия  $\mu_2$  на  $\sigma_{\text{гл}}$  включает в себя только два последовательно соединенных участка объекта регулирования:  $W_{\text{об1}}(s)$  и  $W_{\text{об2}}(s)$ , где  $W_{\text{об2}}(s)$  — канал воздействия  $\mu_2$  на дополнительную регулируемую величину  $\sigma_{\text{доп}}$ , изменение которой обеспечивает ввод в диапазон регулирующего воздействия  $\mu_1$ . Во втором случае (см. рис. 2, б) к рассмотренному каналу воздействия  $\mu_2$  на  $\sigma_{\text{гл}}$  добавляется параллельно действующий канал  $W_{\text{об3}}(s)$ .

В качестве примеров использования данных структурных решений можно привести регулятор первого впрыска прямоточного котла  $W_{\text{р1}}(s)$ , выполненный по простейшей одноконтурной схеме без опережающего сигнала по температуре пара за впрыском. Именно для первого впрыска такое решение часто оказывается вы-

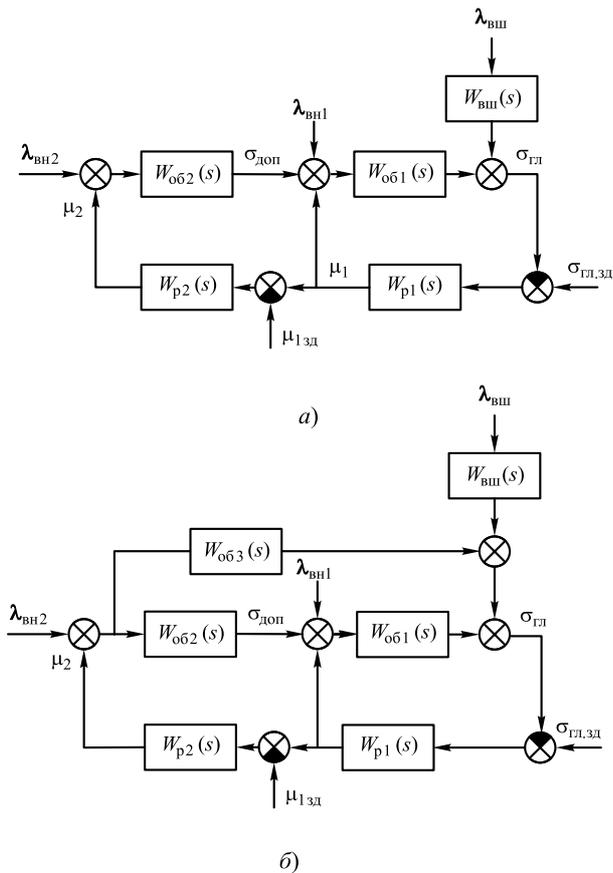


Рис. 2. Структурные схемы двухконтурных АСР с двумя регулирующими воздействиями

нуженным, так как для крупных котлов, в частности котлов энергоблоков мощностью 500 и 800 МВт, уровень температур в сечениях за первыми впрысками соответствует зоне максимальной теплоемкости и сигнал по температуре за впрыском оказывается непредставительным. Если корректор температурного режима по тракту котла, функцией которого является поддержание заданного значения первого впрыска, воздействует на изменение расхода питательной воды, то справедлива структурная схема объекта, представленная на рис. 2, а, так как корректор и регулятор впрыска технологически связаны только через пароводяной тракт (дополнительная регулируемая величина  $\sigma_{\text{доп}}$ ). Если же температурный корректор управляет изменением расхода топлива, то объект регулирования характеризуется структурной схемой, представленной на рис. 2, б, так как к воздействию расхода топлива на пароводяной тракт вплоть до координаты  $\sigma_{\text{доп}}$  добавляется его воздействие по каналу  $W_{\text{об}3}(s)$  на участок тракта, характеризуемый передаточной функцией менее инерционного объекта регулирования  $W_{\text{об}1}(s)$ .

Применительно к многоконтурным АСР с несколькими регулирующими воздействиями целесообразно использовать термин локальной АСР (ЛАСР). Такая система является частью многоконтурной АСР, связанной с одним из регулирующих воздействий и включающей в себя управляющий этим воздействием регулятор и объект регулирования, которым данное воздействие управляет. В структурных схемах, показанных на рис. 2, понятие ЛАСР совпадает с понятием контура, так как каждая из ЛАСР выполнена по одноконтурной схеме. Далее будут рассмотрены ЛАСР и с несколькими регулирующими переменными, т.е. включающими в себя несколько контуров.

Следует отметить, что данное понятие ЛАСР совпадает с используемым при исследовании многосвязных АСР (МАСР) [6] с той лишь разницей, что каждая ЛАСР, входящая в МАСР, имеет свою основную регулируемую величину, тогда как для многоконтурной АСР с несколькими регулирующими величинами только одна ЛАСР поддерживает основную регулируемую величину, а остальные отвечают за поддержание в диапазоне регулирующих воздействий других каскадно «следующих за ними» ЛАСР.

### Анализ динамических свойств многоконтурных АСР

Характеристические уравнения представленных на рис. 1 двухконтурных АСР с двумя регулирующими величинами имеют следующий вид:

$$1 + W_p(s)W_{\text{оп}}(s) [1 + W_{\text{кор}}(s)W_{\text{ин}}(s)] = 0; \quad (1)$$

$$1 + W_p(s) [W_{\text{оп}}(s) + W_{\text{кор}}(s)W_{\text{гл}}(s)] = 0. \quad (2)$$

Для АСР с двумя регулирующими воздействиями, представленной на рис. 2, а, характеристическое уравнение выглядит так:

$$1 + W_{p1}(s)W_{\text{об}1}(s) [1 + W_{p2}(s)W_{\text{об}2}(s)] = 0, \quad (3)$$

а для структуры, приведенной на рис. 2, б, возможны две формы записи уравнения:

$$1 + W_{p1}(s)W_{\text{об}1}(s) [1 + W_{p2}(s)W_{\text{ин}}^*(s)] = 0; \quad (4)$$

$$1 + W_{p1}(s) [W_{\text{об}1}(s) + W_{p2}(s)W_{\text{гл}}^*(s)] = 0, \quad (5)$$

где

$$W_{\text{ин}}^*(s) = W_{\text{об}1}(s) + W_{\text{об}3}(s)/W_{\text{об}1}(s); \quad (6)$$

$$W_{\text{гл}}^*(s) = W_{\text{об}1}(s)W_{\text{об}2}(s) + W_{\text{об}3}(s). \quad (7)$$

Из сопоставления характеристических уравнений (1) и (2), с одной стороны, и (3)—(5) — с другой, следует, что двухконтурные системы обоих типов динамически аналогичны, причем передаточные функции отдельных элементов соответствуют одна другой (см.

**Соответствие элементов структурных схем вариантов двухконтурных АСР**

Структурная схема двухконтурной АСР		Передаточные функции участков регулирования			Передаточные функции регуляторов	
С двумя регулируемыми величинами		$W_{оп}(s)$	$W_{ин}(s)$	$W_{гл}(s)$	$W_{р}(s)$	$W_{кор}(s)$
С двумя регулирующими воздействиями	Рис. 2, а	$W_{об1}(s)$	$W_{об2}(s)$	$W_{об1}(s) \times W_{об2}(s)$	$W_{р1}(s)$	$W_{р2}(s)$
	Рис. 2, б		$W_{ин}^*(s)$	$W_{гл}^*(s)$		

таблицу). Это соответствие позволяет использовать при анализе и синтезе АСР с двумя регулирующими воздействиями те же положения, что и для АСР с двумя регулируемыми переменными. Таким образом, является возможность:

оценить динамические свойства двухконтурных АСР по соотношению динамики эквивалентных опережающего  $[W_{об1}(s)]$  и инерционного  $[W_{об2}(s)$  или  $W_{ин}^*(s)]$  участков, например, достижения динамической развязки при соотношении резонансных частот контуров регулирования с этими объектами более чем 3:1;

выполнять промышленную наладку и расчетную настройку АСР в последовательности: быстрый контур, т.е.  $W_{р1}(s)$ , а затем медленный контур, т.е.  $W_{р2}(s)$ ;

применять для расчетной и экспериментальной настроек методы, разработанные для АСР с двумя регулируемыми переменными;

распространить данные положения на АСР с числом контуров, большим двух.

Поскольку, как уже отмечалось, АСР с двумя и более регулирующими воздействиями для поддержания температуры пара с автоматической коррекцией положения клапанов впрыска широко распространены, особый интерес представляет реализация ЛАСР, воздействующей на  $\mu_1$  по двухконтурной структуре с дополнительной малоинерционной переменной. На рис. 3 представлен вариант такой, уже трехконтурной АСР для двух рассматриваемых вариантов объекта: в более простом случае, без канала  $W_{об3}(s)$  (рис. 3, а) и при его наличии (рис. 3, б). Для большей наглядности изложения реализация двухконтурного варианта ЛАСР воздействия на  $\mu_1$  выполнена по каскадной структуре со стабилизирующим  $[W_{р1}(s)]$  и корректирующим  $[W_{кор1}(s)]$  регуляторами. Объект представлен в виде

последовательного соединения опережающего  $[W_{оп1}(s)]$  и инерционного  $[W_{ин1}(s)]$  участков регулирования (как на рис. 1, а).

Характеристическое уравнение данной трехконтурной АСР в более простом варианте объекта (см. рис. 3, а) может быть представлено в следующем виде:

$$1 + W_{р1}(s)W_{оп1}(s) [1 + W_{кор}(s)W_{ин1}(s)] \times [1 + W_{р2}(s)W_{об2}(s)] = 0 \quad (8)$$

или

$$1/[W_{р1}(s)W_{оп1}(s)] + [1 + W_{кор}(s)W_{ин1}(s)] \times [1 + W_{р2}(s)W_{об2}(s)] = 0. \quad (9)$$

Поскольку инерционность участка  $W_{оп1}(s)$  мала по сравнению с динамикой участков  $W_{ин1}(s)$  и  $W_{об2}(s)$ , имеется возможность достаточно большого увеличения коэффициента усиления регулятора  $W_{р1}(s)$ . В области относительно низких резонансных частот двух других, более инерционных контуров модуль частотной характеристики  $W_{оп1}(j\omega)W_{р1}(j\omega)$  будет достаточно большим и первое слагаемое выражения (9) обратится в нуль. При этом общее характеристическое уравнение АСР распадется на два независимых уравнения инерционных контуров, что свидетельствует об отсутствии их взаимовлияния и возможности независимой настройки каждого из них. Полученная закономерность не зависит от структуры двухконтурной АСР, воздействующей на  $\mu_1$  (каскадная или с опережающим скоростным сигналом), а определяется только динамическими свойствами ее опережающего контура, т.е. степенью его динамической развязки с инерционными контурами.

Характеристическое уравнение рассматриваемой трехконтурной АСР при наличии в объекте дополнительного канала непосредственного влияния регулирующего воздействия  $\mu_2$  на основную регулируемую величину  $\sigma_{гл}$  (см. рис. 3, б) содержит дополнительное слагаемое

$$1 + W_{р1}(s)W_{оп1}(s) [1 + W_{кор}(s)W_{ин1}(s)] \times [1 + W_{р2}(s)W_{об2}(s)] + W_{р1}(s)W_{кор}(s)W_{р2}(s)W_{об3}(s) = 0 \quad (10)$$

или

$$1/[W_{р1}(s)W_{оп1}(s)] + [1 + W_{кор}(s)W_{ин1}(s)] \times [1 + W_{р2}(s)W_{об2}(s)] + W_{кор}(s)W_{р2}(s)W_{об3}(s)/W_{оп1}(s) = 0, \quad (11)$$

что в общем случае не позволяет исключить взаимное влияние инерционных контуров и обеспечить независимую настройку регуляторов  $W_{кор}(s)$  и  $W_{р2}(s)$ . В конкрет-

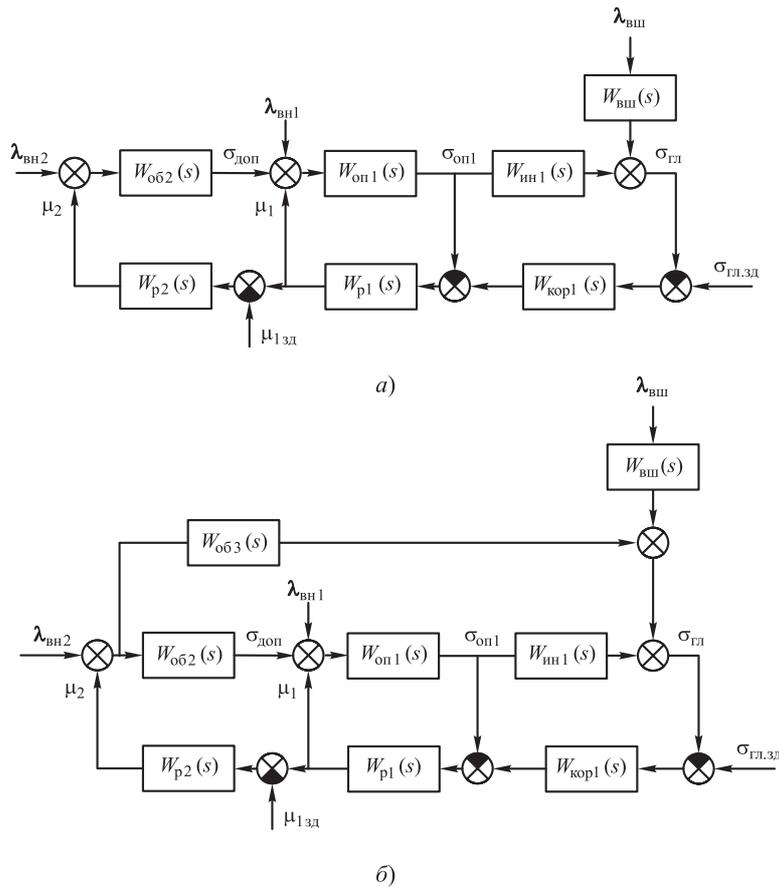


Рис. 3. Структурные схемы трехконтурных АСР с двумя регулирующими воздействиями

ных случаях степень их взаимодействия определяется относительным весом канала  $W_{об3}(s)/W_{оп1}(s)$  по сравнению с участками  $W_{ин1}(s)$  и  $W_{об2}(s)$ , но, как показывает накопленный опыт применения данной структуры (ниже будет рассмотрен один из характерных примеров), приемлемой степени развязки достичь удастся практически всегда.

### Исследование многоконтурной АСР температуры пара прямоточного котла

В качестве примера многоконтурной АСР с несколькими регулирующими воздействиями и реализацией отдельных ЛАСР по двухконтурной схеме далее рассматривается АСР температуры пара прямоточного котла ТГМП-314 с автоматической коррекцией положения клапанов впрысков. Структурная схема системы представлена на рис. 4.

Автоматическая система регулирования температурного режима каждого из двух потоков котла включает в себя три ЛАСР:

температуры в промежуточном сечении тракта котла воздействием на соотношение вода — топливо (ЛАСР 1);

первого впрыска  $\mu_{впр1}$  (ЛАСР 2);

второго (выходного) впрыска  $\mu_{впр2}$  (ЛАСР 3).

При отсутствии автоматической коррекции клапанов впрыска основными регулируемыми параметрами являются:

температура среды перед первым впрыском за экранами поворотной камеры (ЭПК)  $t''_{ЭПК}$  (ЛАСР 1);

температура пара перед вторым впрыском за ширмовым пароперегревателем  $t''_{ш.п}$  (ЛАСР 2);

температура пара на выходе из котла  $t_{пе}$  (ЛАСР 3).

В качестве опережающей регулируемой величины ЛАСР 1 использована температура за верхней радиационной частью (ВРЧ)  $t''_{ВРЧ}$ , а двух других ЛАСР — температуры пара за впрысками  $t''_{впр1}$  и  $t''_{впр2}$ . Все три ЛАСР выполнены по схеме с опережающим скоростным сигналом, т.е. с дифференциаторами  $W_{д1}(s)$ ,  $W_{д2}(s)$ ,  $W_{д3}(s)$ .

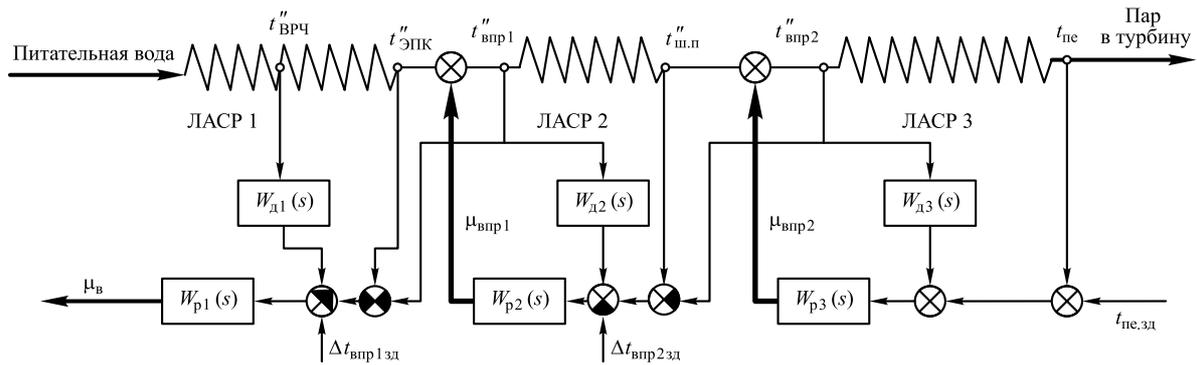


Рис. 4. Структурная схема многоконтурной АСР температуры пара прямооточного котла

Для осуществления автоматической коррекции положения клапанов впрысков в качестве показателя значения регулирующего воздействия — расхода воды на впрыск — используются перепады температур на впрысках ( $\Delta t_{впр}$ ): на первом впрыске ( $\Delta t_{впр1}$ ) — для ЛАСР 1, на втором впрыске ( $\Delta t_{впр2}$ ) — для ЛАСР 2, которые и являются основными регулируемыми величинами соответствующих ЛАСР.

Представленная АСР температуры котла есть многоконтурная система с одной регулируемой величиной (температурой пара на выходе котла  $t_{пе}$ ) и тремя регулирующими воздействиями (соотношение вода — топливо, первый и второй впрыски), причем каждая из трех ЛАСР, входящих в состав АСР температуры котла, выполнена по двухконтурной схеме. Как было показано ранее при анализе выражения (9), в многоконтурной структуре с несколькими регулирующими воздействиями наличие опережающих контуров позволяет «развязать» собственные движения АСР и тем самым обеспечить возможность независимой настройки инерционных контуров «своей» и предвключенной ЛАСР.

Для подтверждения результатов проведенного анализа выполнено моделирование рассматриваемой АСР, причем в качестве регулирующего воздействия соотношения вода — топливо выбрано изменение расхода топлива  $\mu_v$ . Мотивировано это решение следующим. Дело в том, что для регулирования соотношения вода — топливо прямооточного котла в отечественной практике используются оба регулирующих воздействия [5]: для пылеугольных котлов чаще всего изменение расхода топлива, для газомазутных — изменение расхода питательной воды. Для обоих вариантов целесообразно использовать единую многоконтурную АСР температуры пара. Как уже отмечалось, для представления взаимосвязи между регулятором первого впрыс-

ка и корректором температуры, воздействующим на расход питательной воды, справедливы структурные схемы двухконтурной АСР (см. рис. 2, а) и соответствующей ей трехконтурной АСР (см. рис. 3, а), при воздействии на расход топлива — структурные схемы, показанные на рис. 2, б и 3, б, так как в этом случае необходим учет канала  $W_{об3}(s)$ . Доказанная в данной работе развязка инерционных контуров связанных локальных АСР в чистом виде наблюдается для трехконтурной структуры АСР (см. рис. 3, а), а для схемы, показанной на рис. 3, б, эту развязку [как следует из выражения (11)] может нарушить связь инерционных контуров через участок  $W_{об3}(s)$ . Для проверки возможности развязки и выбран вариант температурного корректора с воздействием на расход топлива. Исследование было выполнено с использованием комплекса методик-программ оптимизации параметров настройки и моделирования многосвязных АСР [7, 8]. Модель объекта получена на базе экспериментальных динамических характеристик котла ТГМП-314 энергоблока № 6 Трипольской ГРЭС.

На первом этапе исследования была проведена независимая оптимизация параметров настройки каждой из трех ЛАСР, причем в качестве оценки затухания собственных движений систем использовалась степень колебательности  $m = 0,367$  [8], а затем моделировалась вся многоконтурная АСР температуры. Оценка затухания колебательных составляющих собственных движений системы выполнялась путем анализа максимальных значений ее амплитудно-частотных характеристик (АЧХ)  $A(\omega)$  (рис. 5) по каналам «внутреннее возмущение ЛАСР — перемещение ее регулирующего органа» (канал 1) и «заданное значение основной регулируемой величины ЛАСР — сама регулируемая величина» (канал 2). Именно эти показатели (аналоги известного показателя колебательности  $M$  для одноконтурной

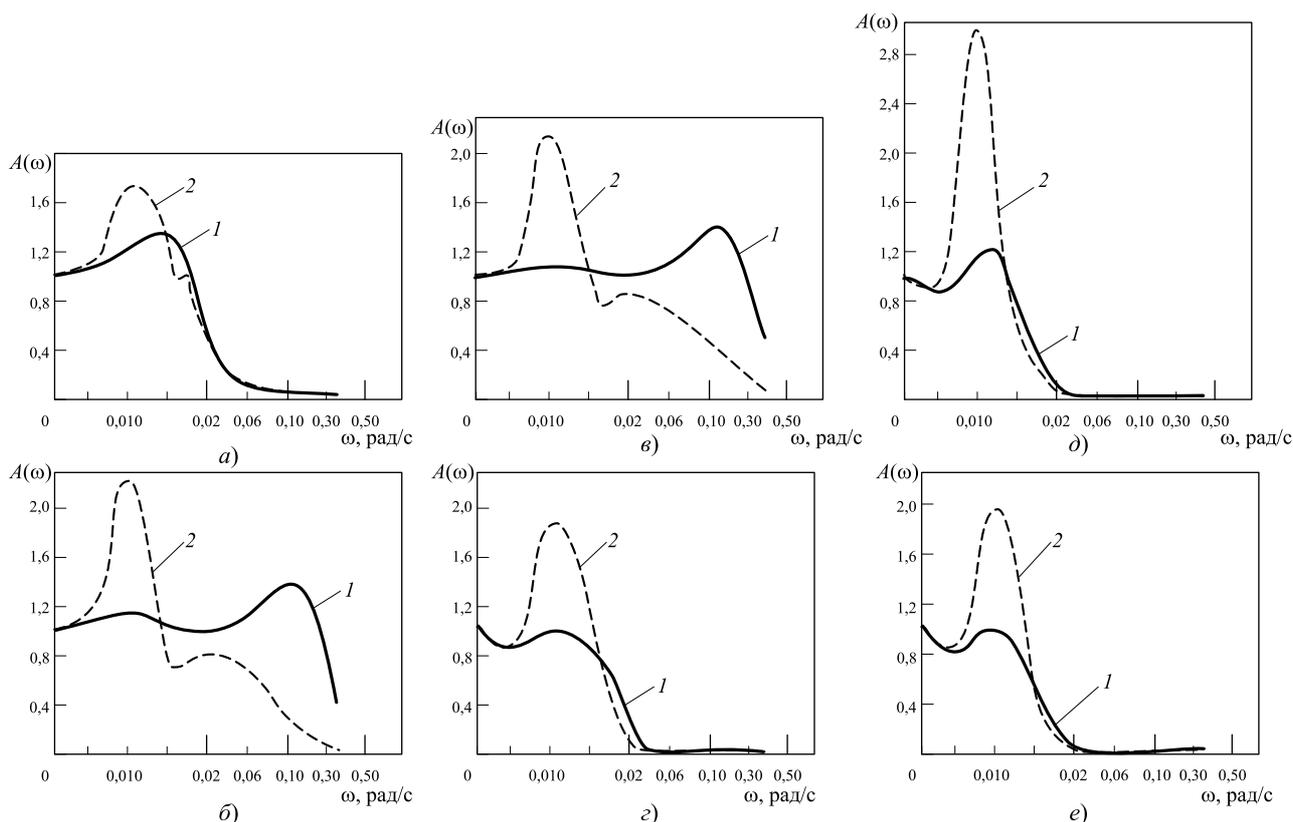


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) многоконтурной АСР температуры пара прямоточного котла.  
*a, б* — ЛАСР 1; *в, г* — ЛАСР 2; *д, е* — ЛАСР 3;  
*a, в, д* — АЧХ по каналу «внутреннее возмущение ЛАСР — перемещение ее регулирующего органа»; *б, г, е* — АЧХ по каналу «заданное значение основной регулируемой величины ЛАСР — сама регулируемая величина»;  
*1* — с оптимальными значениями параметров настройки; *2* — с уменьшенными в 5 раз коэффициентами усиления регуляторов опережающих контуров ЛАСР впрысков

АСР) характеризуют колебательные свойства как двухконтурной ЛАСР с двумя регулируемыми переменными при ее автономном рассмотрении, так и общей многоконтурной структуры, в состав которой входят данные ЛАСР. Для наглядности представления кривых АЧХ ось абсцисс приведена с неравномерной шкалой, т.е. разбита на три интервала (0...0,02; 0,02...0,10; 0,1...0,5 рад/с) со своими шагами дискретности (на рис. 5 эти интервалы отмечены длинными засечками).

На рис. 5 представлены результаты сравнения указанных типов АЧХ многоконтурной АСР температуры для двух вариантов: первый — с оптимальными значениями параметров настройки всех элементов регулирования, второй — со значительно уменьшенными (для примера, в 5 раз) коэффициентами усиления регуляторов опережающих контуров ЛАСР впрысков. Это приводит к отсутствию «развязки» инерционных контуров ЛАСР между собой из-за невозможности пренебрежения первым членом уравнения (9) или (11).

Как видно из рис. 5, при оптимальных значениях параметров настройки регуляторов впрысков колебательность многоконтурной АСР лежит в допустимых пределах — максимумы не превышают «нормативного» значения (1,55) для одноконтурных АСР и составляют не более 1,2 для канала 2 и не более 1,4 для канала 1. При «загрублении» значений параметров настройки регуляторов опережающих контуров, т.е. нарушении условий развязки, значения пиков АЧХ существенно увеличиваются, не только превосходя значение 1,55, но и достигая значений 2,0 и даже 3,0 для каналов ЛАСР первого впрыска, структурно расположенной между двумя другими ЛАСР.

Важно отметить, что заметное ухудшение качества регулирования наступает только при существенном «загрублении» коэффициентов усиления регуляторов впрыска: более чем в 2,0—2,5 раза. Реальное же, всегда наблюдаемое отклонение значений коэффициента усиления от оптимального значения, вызванное нелинейностью расходной характеристики регулирующего

органа, зависимостью динамики опережающего участка от нагрузки, не выходит за эти пределы и не приводит к сколько-нибудь заметной взаимосвязи инерционных контуров ЛАСР.

В то же время необходимо обратить внимание на то, что при реализации ЛАСР температуры по схеме с опережающим скоростным сигналом коэффициентом усиления опережающего контура является произведение коэффициентов усиления регулятора ( $k_p$ ) и дифференциатора ( $k_d$ ), и именно оно должно оставаться близким к оптимальному значению во всем диапазоне нагрузок. Поэтому если в соответствующей ЛАСР температуры для обеспечения высокого качества регулирования инерционных контуров во всем диапазоне нагрузок предусмотрена автоподстройка  $k_d$ , то для сохранения неизменным произведения  $k_p k_d$  необходимо реализовать обратный закон автоподстройки  $k_p$ .

### Опыт внедрения многоконтурных АСР температуры пара крупных прямоточных котлов

Приведенные результаты исследования и первый опыт внедрения единых многоконтурных АСР температуры пара с автоматической коррекцией положения клапанов впрыска были получены в конце 80-х годов прошлого века при работе автора в ВТИ. Объекты внедрения — проекты модернизации АСР энергоблоков 300 МВт, в частности Литовской и Трипольской ГРЭС, созданных на базе первых отечественных микропроцессорных контроллеров Ремиконт.

В последние полтора десятилетия разработанные решения нашли широкое применение в большом количестве проектов ЗАО «Интеравтоматика» по созданию новых и, главное, модернизации существующих АСУ ТП энергоблоков мощностью 300, 500, 800 МВт на базе ПТК фирмы Siemens: Teleperm XP-R, Simatic PCS7PS, SPPA-T3000 [5, 9, 10]. Среди объектов внедрения можно указать пылеугольные энергоблоки 800 МВт № 1 и 2 Березовской ГРЭС, 500 МВт № 7—10 Рефтинской ГРЭС, 300 МВт № 3 и 4 ТЭС Аксу в Казахстане и № 1 Зуевской ГРЭС в Украине; газомазутные энергоблоки 300 МВт № 1—3, 5 Ириклинской ГРЭС, № 2, 4, 5 Киришской ГРЭС, № 5 Ставропольской ГРЭС, № 10 Среднеуральской ГРЭС и Т-250 № 4 и 7 ТЭЦ-25, № 7 ТЭЦ-26, № 8 ТЭЦ-21 ОАО «Мосэнерго». Особое значение задача качественного регулирования температурного режима по тракту прямоточного котла приобрела в связи с необходимостью выполнения требований обычного и нормированного первичного и автоматического вторичного регулирования час-

тоты (ОПРЧ, НПРЧ, АВРЧ), а также жестких требований к поддержанию коммерческого графика нагрузки.

Представленная на рис. 4 структурная схема единой АСР температуры может быть принята в качестве базовой как для пылеугольных, так и для газомазутных котлов. Однако в связи с необходимостью учета, с одной стороны, некоторых технологических факторов, приводящих к усложнению задачи регулирования температурного режима, а с другой стороны, широких функциональных возможностей современных микропроцессорных ПТК по реализации более совершенных алгоритмов всережимного многоконтурного регулирования, в каждом конкретном случае схема АСР может быть существенно видоизменена. В числе определяющих технологических факторов можно выделить:

разветвление потоков по ходу среды, например, перед первыми впрысками, что требует реализации связи двух регуляторов первых впрысков с одним температурным корректором;

уже частично упомянутое ранее нахождение сечений пароводяного тракта как за, так и перед первым впрыском, в зоне максимальной теплоемкости, что приводит к непредставительности температурных сигналов;

требование снижения уровня температур по пароводяному тракту для минимизации температурных напряжений, реализуемое путем, во-первых, вывода из работы отдельных впрысков вообще или перевода их в закрытое положение со стерегущим режимом работы регуляторов, а во-вторых, достаточно малого значения заданной степени открытия других впрысков.

Основные алгоритмические усовершенствования при построении единой АСР температуры котла, реализуемые в проектах ЗАО «Интеравтоматика», состоят в следующем.

1. Использование в качестве главного решения по построению отдельных ЛАСР температуры многоконтурных АСР с упрощенными моделями участков регулирования [4]. Это обеспечивает реализацию в инерционных контурах ПИД- и более сложных законов регулирования и тем самым заметное улучшение качества процессов регулирования по сравнению с традиционными решениями или его сохранение при существенно большей степени затухания переходных процессов. Это позволяет:

улучшить качество переходных процессов в отдельных ЛАСР благодаря вводу дополнительных сигналов в рассечках пароперегревателей вне зависимости от соотношения динамических свойств возникающих при этом участков регулирования;

реализовать рассмотренную в данной статье структуру взаимосвязанных ЛАСР температурной коррекции и первого впрыска в случае, когда отсутствует возможность их частотной развязки (например, вследствие невозможности использовать сигнал по температуре среды в сечении за первым впрыском из-за его нахождения в зоне максимальной теплоемкости).

2. Из двух вариантов формирования сигнала, характеризующего значение регулирующего воздействия клапана впрыска: перепад температур на впрыске и положение клапана, — предпочтение, особенно для клапанов первого впрыска, отдается второму решению как более представительному с учетом всей совокупности возможных режимов работы соответствующей локальной АСР.

3. При наличии в котле разветвления потоков формируется результирующий сигнал по усредненному значению небалансов клапанов впрыска, что позволяет учитывать особенности каждого клапана, задавая его собственное требуемое положение. В случае большой разбежки небалансов преимущество предоставляется клапану, идущему на открытие.

4. Путем изменения структуры АСР температуры котла и/или параметров ее настройки обеспечивается учет всего комплекса режимов работы АСР, например:

переход от пускового режима к режиму рабочих нагрузок и от последнего к останову энергоблока;

вступление в работу стерегущего регулятора и закрытие подчиненного ему клапана;

выход из строя отдельных датчиков или клапанов.

В [5] приведены примеры функционирования разработанной в соответствии с описанными решениями АСР температуры котла энергоблока 300 МВт № 5 Ставропольской ГРЭС в таких сложных режимах эксплуатации энергоблока, как:

изменение нагрузки от минимальной до максимальной границы регулировочного диапазона со скоростью 10 МВт/мин;

проведение испытаний на соответствие Стандарту СО ЕЭС в пределах аварийного резерва НПРЧ  $\pm 37$  МВт;

срабатывание автоматической системы аварийной разгрузки блока (АСАРБ) по отключению питательного турбонасоса при работе энергоблока на нагрузке 300 МВт.

Во всех режимах температурный режим поддерживался с высокой точностью, при которой отклонения температуры не достигали уставок срабатывания предупредительной сигнализации.

## Выводы

1. Многоконтурные АСР с несколькими регулирующими воздействиями являются одной из типовых структур построения АСР современных энергоблоков, используемой, в первую очередь, для регулирования температуры первичного и вторичного пара. Методы анализа и синтеза этих АСР во многих аспектах аналогичны применяемым для широко распространенных многоконтурных АСР с несколькими регулирующими переменными.

2. При включении в состав АСР с несколькими регулирующими воздействиями локальной АСР с несколькими регулирующими переменными, содержащей оптимально настроенные малоинерционные опережающие контуры, имеется возможность частотной развязки инерционных контуров данной и каскадно предвключенной к ней локальных АСР.

3. Эффективным решением, хорошо зарекомендовавшим себя на многих крупных энергоблоках с пылеугольными и газомазутными прямоточными котлами, является построение АСР температуры пара котла в виде единой многоконтурной АСР, объединяющей многоконтурные ЛАСР впрысков и температурной коррекции соотношения вода — топливо.

## Список литературы.

1. **Александрова Н.Д.** Расчет параметров динамической настройки регуляторов температуры пара с опережающим скоростным сигналом // Теплоэнергетика. 1965. № 4. С. 24—29.
2. **Ротач В.Я.** Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М.: Энергия, 1973.
3. **Биленко В.А., Давыдов Н.И.** Сравнительный анализ динамики двух вариантов двухконтурных систем регулирования // Теплоэнергетика. 1979. № 2. С. 73—76.
4. **Биленко В.А., Шавочкин И.А.** Анализ эффективности введения сложных законов преобразования дополнительных сигналов в многоконтурных автоматических системах регулирования энергоблоков // Теплоэнергетика. 2006. № 4. С. 57—65.
5. **Усовершенствование** автоматических систем регулирования технологических параметров энергоблоков / В.А. Биленко, Э.Э. Микшевич, Д.Ю. Никольский и др. // Теплоэнергетика. 2008. № 10. С. 34—44.
6. **Биленко В.А.** Теория и практика многосвязного регулирования энергоблоков // Теплоэнергетика. 2010. № 10. С. 27—36.
7. **Биленко В.А., Чесноковский В.З., Шилова Ю.С.** Модель для исследования многосвязных систем регулирования энергоблоков // Теплоэнергетика. 1983. № 10. С. 19—23.
8. **Биленко В.А., Шилова Ю.С., Белькинд Л.А.** Комплекс методик-программ для оптимизации параметров настройки многосвязных систем регулирования энергоблоков // Теплоэнергетика. 1989. № 1. С. 30—35.
9. **Биленко В.А.** АСУ ТП как основа существенного повышения уровня автоматизации // Энергетик. 2007. № 10. С. 14—18.
10. **Основные** результаты работы ЗАО «Интеравтоматика» за 15 лет / В.В. Лыско, А.Г. Свицерский, В.А. Биленко, А.А. Ананьев // Теплоэнергетика. 2008. № 10. С. 2—9.