

Многосвязное регулирование энергоблоков на базе современных программно-технических комплексов

Биленко В.А.¹, канд. техн. наук

ЗАО «Интеравтоматика»

Проанализированы возможности современных программно-технических комплексов (ПТК) для реализации многосвязных автоматических систем регулирования энергоблока. Сформулированы требования к структуре этих систем и подходы к их построению. Сопоставлены различные структурные схемы многосвязных систем регулирования и выполнен анализ их основных характеристик.

При разработке автоматических систем регулирования (АСР) сложных энергетических объектов, в первую очередь энергоблоков с прямоточными котлами, одним из определяющих факторов всегда являлось наличие существенных взаимосвязей между локальными АСР (ЛАСР). В то же время решение проблемы многосвязности сдерживалось возможностями аппаратной реализации АСР. Развитие аппаратных средств позволило снять определенные ограничения и решать указанную проблему более качественно. Внедряемые в настоящее время распределенные микропроцессорные АСУ ТП энергоблоков на базе современных ПТК позволяют получить существенно более эффективное решение проблемы многосвязности, чем при использовании не только аналоговой техники, но и применяемых в 80-90-х годах автономных микропроцессорных контроллеров.

Возможности современных ПТК

Для современных ПТК характерны следующие важные качества:

высочайшая надежность новой аппаратуры и глубина ее самодиагностики, позволяющие строить структуры многосвязных АСР (МАСР) с учетом малой вероятности выхода из строя ее отдельных частей, обеспечивая в этом крайне редко возникающем случае лишь безопасность поведения объекта;

диагностика периферийного оборудования систем автоматического регулирования (датчиков, регулирующих органов и аппаратуры передачи на последние выходные команд ПТК), исключающая возможность непредвиденного поведения МАСР при отказах данного оборудования, если будет предусмотрена реконфигурация их структуры для подобного типа неисправностей;

высокоразвитое базовое программное обеспечение, с помощью которого реализуется любой физически выполнимый закон динамического преобразования и любые логические операции изменения структуры МАСР

при возникновении соответствующих технологических условий. Причем использование базовой математики при создании загружаемого в АСУ ТП прикладного математического обеспечения должно быть удобным и на стадии проектирования, и в процессе ее наладки и эксплуатации;

разнообразный и удобный интерфейс оператора, позволяющий последнему вызвать на экран структурную схему МАСР, определить, какой ее структурный вариант находится в работе, осуществить коррекцию структуры МАСР в тех непредвиденных случаях, когда автоматическое изменение не предусмотрено. В любой требуемой комбинации, в любом удобном масштабе, за любой промежуток времени (от минуты до суток и более) представляются кривые переходных процессов. Оператор немедленно информируется о любых автоматически проведенных изменениях структуры МАСР.

Использование указанных и ряда других возможностей ПТК позволяет не только решить проблему многосвязности АСР энергоблоков и существенно улучшить качество процессов регулирования, но и обеспечить высокую степень автоматизации дискретных операций путем внедрения пошаговых логических программ различных уровней иерархии. Тем самым можно добиться принципиально нового уровня автоматизации энергоблоков, при котором практически все управление процессом не только в диапазоне рабочих нагрузок, но и в режимах пуска и останова оборудования, осуществляется автоматически. Полностью управляют логические программы и работой ЛАСР: вводят и выводят их из работы, изменяют структуры, добавляя или исключая отдельные контуры, меняя регулирующие органы и регулируемые параметры.

Основные подходы к синтезу МАСР

Выбор структуры МАСР энергоблока должен производиться на основании следующих требований.

1. Обеспечение высокого качества процессов регулирования (динамические требования). При этом предполагается, что для выполнения требований всережимности должна быть предусмотрена непрерывная авто-

подстройка параметров настройки МАСР от основных режимных факторов: нагрузки, вида сжигаемого топлива. Ввод дополнительной дискретной автоподстройки в зависимости от изменения структуры МАСР возможен, но он должен быть ограничен одним или, в крайнем случае, несколькими условиями, иначе закон автоподстройки окажется очень сложным с позиции реализации и контроля.

2. Удобство настройки МАСР, т.е. возможность сведения процесса ее промышленной наладки к ряду последовательных этапов настройки отдельных элементов системы без или с минимально возможным количеством итерационных процедур. Это требование обеспечивает и принципиальную возможность создания методов ее автоматизированной настройки.

3. Возможность осуществления структурных изменений МАСР без коррекции (или с минимальной коррекцией по легко формируемым зависимостям) неизменяемой части МАСР. Эти структурные изменения могут происходить при:

последовательном включении в работу (или отключении) в процессе пуска (или останова) энергоблока отдельных ЛАСР;

переводе отдельных регулирующих органов с автоматического на ручное управление и обратно;

исчерпании диапазона регулирования отдельных регулирующих органов;

смене регулирующих органов или регулируемых параметров отдельных ЛАСР в процессе изменения режима работы оборудования;

выходе из строя датчиков или регулирующих органов отдельных ЛАСР.

Существуют два подхода к построению МАСР. Первый — традиционно-технологический, рассматривающий МАСР как систему, состоящую из совокупности локальных АСР, каждая из которых решает свою технологическую задачу с собственными регулируемым параметром и регулирующим органом и может включать в себя требуемое число контуров. Проблема многосвязности решается путем ввода перекрестных связей между ЛАСР, обеспечивающих улучшение качества процессов регулирования и упрощение процедуры настройки МАСР. В отечественной энергетике данные работы проводились в основном под руководством профессора Н.И. Давыдова (ВТИ) и позволили на существующем аппаратном уровне решать ряд задач регулирования: питания многотопочных котлов: питания, расхода топлива, мощности энергоблока и давления пара перед турбиной. В дальнейших работах на базе матричных методов анализа и синтеза МАСР [1, 2] были в общем виде сформулированы подходы к решению проблемы многосвязности и в матричном виде проанализированы динамические свойства введения различных вариантов перекрестных связей.

Второй подход, распространенный в 70—80-х годах, был связан с многочисленными попытками применения для создания МАСР энергоблоков тех или иных

направлений теории оптимального управления. Была поставлена задача синтеза многосвязного регулятора, представляющего собой «черный ящик», определение всех элементов матрицы которого производится единой процедурой без учета различия их ролей в структурных и динамических свойствах образуемой МАСР. При реальном внедрении такого «лобового» метода, конечно, возникало большое количество проблем: ввод интегральных составляющих законов регулирования; отсутствие способов учета неточности задания исходных динамических характеристик объекта регулирования и, как следствие, сложность реализации процедуры наладки; отсутствие возможности решения сформулированных выше задач изменения структуры системы. Неудивительно, что сколько-нибудь широкого распространения подобный подход к построению МАСР не нашел. Анализ работ рассматриваемого направления приведен в [3].

Выбор структуры МАСР

Представленный выше традиционно-технологический подход к синтезу МАСР включает в себя три структурные задачи:

определение оптимального соответствия между регулирующими органами и регулируемыми параметрами при формировании отдельных ЛАСР;

выбор оптимальной структуры каждой ЛАСР;

выбор оптимальных вариантов перекрестных связей между ЛАСР.

Первая из указанных задач носит ограниченный характер, так как в большинстве случаев соответствие между регулирующими органами и регулируемыми параметрами определяется технологией процесса. Исключение составляет распределение функций между регулятором нагрузки котла и регулятором турбины [4], между регуляторами питания и топлива прямооточного котла [5], между отдельными регуляторами пылесистем прямого вдувания топлива. Имеющийся опыт и результаты указанных и ряда других материалов позволяют принять оптимальное решение уже на стадии проектирования. В то же время при использовании современных ПТК можно без особых проблем предусмотреть альтернативные решения и выбрать наиболее оптимальное из них на стадии наладки.

Большинство ЛАСР инерционных параметров энергоблоков традиционно выполнялись по одной из двух контурных структур: каскадной (с корректирующим регулятором) или с опережающим скоростным сигналом (с дифференциатором). При использовании ПТК широкое распространение получила схема с подключаемой параллельно объекту моделью инерционного участка, представляющая собой фактически разновидность структуры с опережающим скоростным сигналом с более высоким порядком дифференциатора. Это обеспечивает реализацию в инерционном контуре эквивалентного регулятора с дифференциальными со-

ставляющими первого и более высоких порядков закона регулирования.

Наиболее серьезной является проблема синтеза общей структуры, т.е. ввода перекрестных связей между ЛАСР. Речь идет не о единой структуре МАСР энергоблока с более чем 100 ЛАСР, а лишь об определенных ее частях, т.е. группах ЛАСР, взаимодействие между которыми нельзя не учитывать для достижения требуемого качества регулирования. Необходимо выделить два вида взаимосвязанности: с однотипными и разнотипными ЛАСР. Под однотипными понимаются локальные системы с физически одинаковыми регулирующими органами и регулируемыми параметрами. Однотипность порождается многопоточностью технологического процесса. И для однотипных, и для разнотипных систем ввод перекрестных связей обычно направлен на развязку ее собственных движений, что математически описывается диагонализацией матрицы возвратных разностей МАСР. Очевидно, что идеальной развязки быть не может. Речь идет только о существенном снижении доли перекрестных элементов матрицы по сравнению с диагональными.

Многосвязная АСР с однотипными локальными АСР (МОАСР)

На рис. 1, а показана матричная структурная схема исходного варианта МАСР с однотипными ЛАСР —

с индивидуальными регуляторами каждого потока. Здесь $\bar{\sigma}$, $\bar{\mu}$, $\bar{\sigma}_{зд}$, $\bar{\lambda}_{вн}$ и $\bar{\lambda}_{вн}$ — n -мерные векторы регулируемых величин, регулирующих и задающих воздействий, внутренних и внешних возмущений; $H(s)$ и $H_{вн}(s)$ — $n \times n$ матрицы объекта по каналам регулирующих воздействий и внешних возмущений; $R(s)$ — диагональная матрица n одинаковых локальных регуляторов $r_{ii}(s) = r(s)$ ($i = 1, \dots, n$).

Элементы матрицы можно представить в следующем виде:

$$h_{ii}(s) = a(s) + \delta_{ii}(s); \quad i = 1, \dots, n; \quad (1)$$

$$h_{ij}(s) = b(s) + \delta_{ij}(s); \quad i, j = 1, \dots, n; \quad i \neq j, \quad (2)$$

где $a(s)$ и $b(s)$ — передаточные функции диагональных и недиагональных элементов объекта в предположении о полном равенстве динамики идентичных каналов; $\delta_{ij}(s)$ ($i, j = 1, \dots, n$) — операторные погрешности, характеризующие их реальные отличия.

На рис. 2, а, б показан пример простейшей двусвязной однотипной АСР.

Собственные движения МАСР и соответственно условия для выбора параметров настройки определяются ее характеристическим уравнением

$$\det G_{a,p}(s) = \det [E + H(s)R(s)] = 0, \quad (3)$$

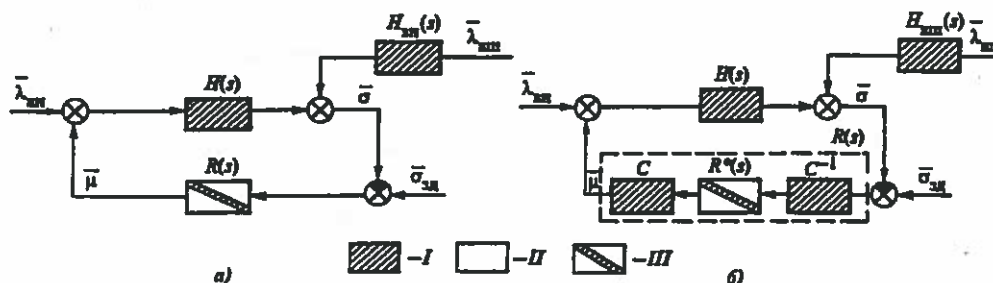


Рис. 1. Матричные структурные схемы МОАСР.

а — простейшая структура МОАСР; б — структура МОАСР с регуляторами суммарного и разностного движения; I — значащие элементы матрицы; II — нулевые элементы матрицы; III — элементы главной диагонали

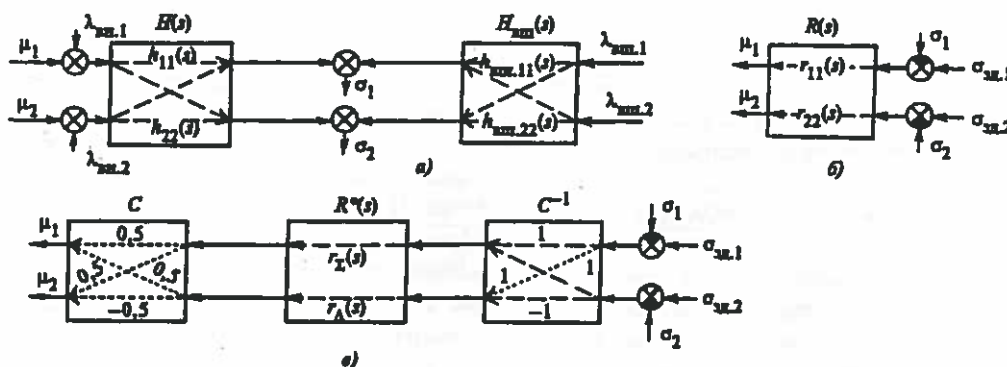


Рис. 2. Структурные схемы МОАСР при $n = 2$.

а — объект регулирования; б — простейшая структура; в — структура с регуляторами суммарного и разностного движений

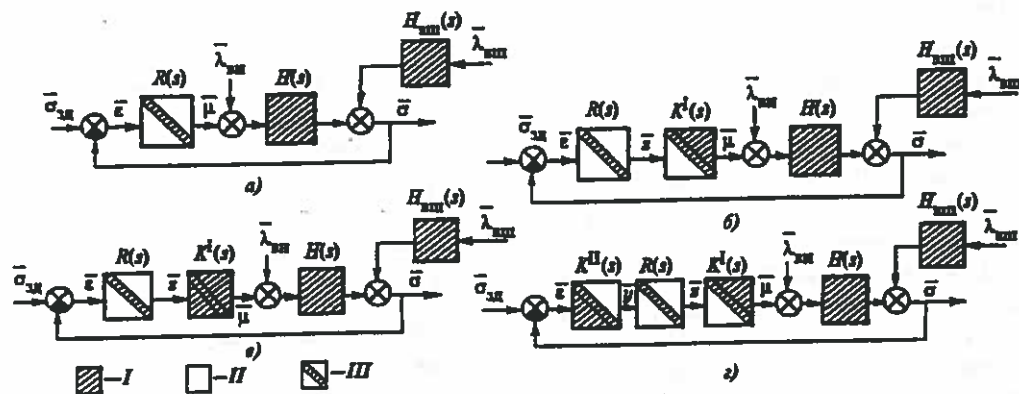


Рис. 3. Матричные структуры схемы МАСР с разнотипными ЛАСР.
 а — исходная структура; б — вариант с односторонней развязкой; в — вариант 1; г — вариант 2; I—III — см. рис. 1

где $G_{в.р}$ — матрица возвратных разностей МАСР; \det — символ определителя; E — единичная матрица.

Для выбранного примера двухсвязной системы

$$G_{в.р}(s) = \begin{vmatrix} 1 + h_{11}(s) \times r_{11}(s) & h_{12}(s) \times r_{22}(s) \\ h_{21}(s) \times r_{11}(s) & 1 + h_{22}(s) \times r_{22}(s) \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Очевидно, что в подобной МОАСР нет возможности независимо настроить регулятор $r_{ii}(s)$ для объекта $h_{ii}(s)$, процедуры настройки регуляторов взаимосвязаны, причем степень взаимовлияния определяется относительным весом недиагональных элементов $H(s)$ по сравнению с диагональными.

Для достижения диагонального вида матрицы $G_{в.р}(s)$ и соответственно независимости настройки регуляторов $r_{ii}(s)$ используется преобразование подобия матриц [1, 2]. В идеальном случае при $\sigma_{ij}(s) = 0$ ($i, j = 1, \dots, n$) это приводит [6] к измененной структуре матричного регулятора (рис. 1, б), в которой $n \times n$ числовые матрицы C и C^{-1} обеспечивают такое преобразование входных и выходных сигналов регуляторов $r_{ii}^*(s)$ ($i = 1, \dots, n$), при котором один из них ($i = 1$) является регулятором суммарного движения с передаточной функцией эквивалентного объекта $h_{11}^*(s) = a(s) + (n-1) \times b(s)$, а все остальные $r_{ii}^*(s)$ ($i = 2, \dots, n$) — регуляторами разностного движения с $h_{ii}^*(s) = a(s) - b(s)$ ($i = 2, \dots, n$). Пример реализации структуры с регуляторами суммарного и разностного движений для двухсвязной системы приведен на рис. 2, в.

Динамические различия структур МОАСР с регуляторами каждого потока и с регуляторами суммарного и разностного движений определяются [5] двумя факторами: относительным весом перекрестных связей по сравнению с прямыми и различиями динамики однотипных каналов с оценкой обоих этих факторов в области резонансных частот. Чем больше вес перекрестных связей и меньше различия динамики однотипных

каналов, тем более предпочтительным в динамическом плане может оказаться использование структур МОАСР с регуляторами суммарного и разностного движений. Более удобной будет в ней и процедура настройки. По третьему же показателю — удобству реализации структурных изменений МАСР, в частности при переводе на дистанционное управление регулирующими органами одного или нескольких потоков, имущества практически всегда имеет структуру МОАСР с индивидуальными регуляторами потоков

Многосвязная АСР с разнотипными локальными АСР

Исходная структура МАСР с разнотипными ЛАСР представлена на рис. 3, а. В ней, аналогично приведенному выше анализу для МАСР с однотипными ЛАСР, матрица возвратных разностей имеет недиагональный вид, и условия настройки регуляторов $r_{ii}(s)$ оказываются взаимосвязанными. В качестве классического структурного решения для достижения развязки (далее — вариант 1) обычно рассматривается [1, 7] ввод матричного компенсатора $K^I(s) = \{k_{ij}^I(s); i, j = 1, \dots, n; k_{ii}^I(s) = 1\}$ на выходе диагональной матрицы регуляторов (рис. 3, в). В схемах МАСР энергоблоков традиционно используется ввод треугольного компенсатора $K^I = \{k_{ji}^I(s); i = 1, \dots, n; j \leq i; k_{ii}^I(s) = 1\}$ (рис. 3, б). Применение компенсаторов $k^I(s)$ непосредственно связано с улучшением качества процессов регулирования как обеспечивает инвариантность регулируемых параметров одних ЛАСР при изменении заданных значений других [1]: при полном компенсаторе (рис. 3, в) в обоих направлениях, при треугольном (рис. 3, б) — в одном. Ограничение односторонней инвариантности в МАСР энергоблоков определяется структурой технологической организации процессов.

Действительно, при изменении заданной нагрузки котла должны меняться и расход топлива, и расход воды, и расход топлива, причем таким образом

чтобы была обеспечена инвариантность температуры среды в промежуточном сечении тракта котла. При изменении расхода топлива должен измениться и расход воздуха, при этом должна быть соблюдена инвариантность сигнала по содержанию O_2 в дымовых газах и т.д. Тогда ЛАСР могут быть определенным образом (в некоторой мере условно) проранжированы в порядке понижения их технологической ответственности (от σ_1 до σ_n), и ввод треугольного компенсатора $K^I(s)$ [рис. 3, б] обеспечивает инвариантность более ответственных регулируемых параметров при изменении заданных значений менее ответственных.

Технологическая значимость инвариантности в обратном направлении не столь велика, а реализация, как будет показано ниже, имеет целый ряд проблем. Использование же одного треугольного компенсатора (рис. 3, б) хотя теоретически и позволяет развязать собственные движения МАСР (определитель треугольной матрицы, как и диагональной, равен произведению ее диагональных элементов), но практически не приводит к удовлетворительным результатам, так как всегда существующее отличие от нуля элементов $G_{v,p}(s)$, лежащих над главной диагональю, ведет при некомпенсированных недиагональных элементах, находящихся под главной диагональю, к значительно большей взаимосвязи собственных движений ЛАСР, чем при близости этих элементов нулю. Это достигается при компенсации связей и в направлении от более ответственных ЛАСР к менее ответственным [8].

В связи с этим специалистами ВТИ было предложено новое решение по реализации двусторонней развязки (далее вариант 2) [8], заключающееся (рис. 3, з) во вводе на входе матрицы регуляторов нижнетреугольного матричного компенсатора $K^{II}(s) = \{k_{ij}^{II}(s);$

$i = 1, \dots, n; i \geq j; k_{ij}^{II}(s) = 1\}$ и в обеспечении инвариантности регулирующих органов менее ответственных ЛАСР $\mu_i (i = 2, \dots, n)$ при внутренних возмущениях $\lambda_{nnj} (j < i)$, приложенных к более ответственным ЛАСР. Выражения для элементов матриц идеальных компенсаторов $K^I(s)$ и $K^{II}(s)$ и соответствующей им диагональной матрицы эквивалентного объекта $G(s)$ представлены в таблице, где $H_i(s)$ обозначает i -й главный минор $H(s)$,

а $H_i^{pq}(s)$ — этот же минор с вычеркиванием строки p и столбца q .

С точки зрения первой группы требований (динамических) к выбору структуры МАСР варианты 1 и 2 различаются в первую очередь передаточными функциями эквивалентных объектов (см. таблицу): в варианте 1 в эту передаточную функцию входят все элементы матрицы объекта, в варианте 2 — только связанные с регулирующими органами и регулируемые параметрами первых i ЛАСР. Влияние более сложной передаточной функции эквивалентного объекта на его динамику зависит от конкретной динамики многосвязного объекта регулирования.

Исходя из второй группы требований — удобства настройки МАСР [9] — существенные преимущества имеет вариант 2, в котором вся процедура сводится к последовательной независимой настройке отдельных элементов МАСР: вначале настраивается регулятор первой ЛАСР, затем, независимо одно от другого, устройства компенсации (УК) между 1-й и 2-й ЛАСР, потом УК, связывающие 3-ю ЛАСР с 1-й и 2-й и т.д. При этом в каждой группе $(i-1)$ УК с $k_{ji}^I(s)$ и $k_{ij}^{II}(s)$, связывающих i -ю ЛАСР с уже настроенными $(i-1)$ ЛАСР, УК настраиваются последовательно, начиная от связывающего i -ю ЛАСР с $(i-1)$ -й до связывающего i -ю ЛАСР с 1-й. В варианте 1 возможность независимой настройки отдельных элементов МАСР отсутствует. Этап настройки группы $(n-1)$ УК от i -й ЛАСР ко всем остальным, предшествующий настройке регулятора i -й ЛАСР, представляет собой совместную процедуру настройки всех $(n-1)$ УК.

Кроме того, при допущении, что погрешности реализации развязки являются величинами первого порядка малости (что практически всегда достижимо), модули погрешностей $\Delta g_{ii}(j\omega)$ в варианте 1 являются величинами первого порядка малости, а в варианте 2 — второго [10]. Следовательно, в варианте 1 результаты оптимизации параметров настройки УК в большей степени, чем в варианте 2, влияют на характеристики эквивалентного объекта, что может привести к необходимости совместной настройки регулятора и связанных с ним УК.

В соответствии с третьей группой требований — удобством изменения структуры МАСР — вариант 2

Идеальные передаточные функции	Вариант 1	Вариант 2	
	$i, j = 1, \dots, n; j \neq i$	$i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, i-1$	
Устройство компенсации	$k_{ji}^I(s) = (-1)^{i-j} \frac{H_n^{II}(s)}{H_n^{II}(s)}$	$k_{ji}^I(s) = (-1)^{i-j} \frac{H_i^{II}(s)}{H_{i-1}(s)}$	$k_{ij}^{II}(s) = (-1)^{i-j} \frac{H_i^{II}(s)}{H_{i-1}(s)}$
Эквивалентные объекты	$g_{ij}^{II}(s) = \frac{H_n(s)}{H_n^{II}(s)}$	$g_{ii}(s) = \frac{H_i(s)}{H_{i-1}(s)}$	

имеет существенные преимущества перед вариантом 1. Если в последнем (см. таблицу) выражения для передаточных функций УК и эквивалентных объектов включают в себя передаточные функции всех элементов матрицы объектов регулирования, то в варианте 2 — только часть объекта регулирования от 1-го до i -го каналов, где i — номер ЛАСР, для которой производится настройка ее регулятора или УК, связывающих ее с уже настроенными ЛАСР. В результате, в варианте 1 отключение любой из ЛАСР или смена в ней регулирующего органа или регулируемого параметра, приводящая к новой динамической характеристике объекта, вызывает необходимость перестройки параметров настройки всех элементов МАСР.

Другая ситуация наблюдается в варианте 2. Здесь отключение или смена регулирующего органа или регулируемого параметра i -й ЛАСР никак не влияет на настройки $(i-1)$ -х ЛАСР ($j=1, \dots, i-1$). Что же касается $(n-i)$ -х ЛАСР ($j=i+1, \dots, n$) и связанных с ними УК, то при исчерпании диапазона регулирования или переводе на дистанционное управление регулирующего органа i -й ЛАСР ($i=1, \dots, n-1$) возникает возможность перехода на поддержание ее регулируемого параметра регулирующим органом менее ответственной j -й ЛАСР (в общем случае $j > i$, обычно $j = n$). Эта задача носит название «переворота» и встречается очень часто в первую очередь для регулирующих органов подачи топлива. Как показано в [11] для двусвязной АСР и может быть показано для систем большего порядка, при правильном выборе параметров настройки УК перенастройка элементов регулирования не требуется.

Таким образом, анализ удобства настройки и удобства изменения структур МАСР свидетельствует о том, что вариант 1 реализации развязки может быть применен или при малом числе ЛАСР, входящих в МАСР, или при сильно разреженной матрице объекта регулирования.

Результаты промышленного внедрения

Описанные выше решения по реализации МАСР — новая структура развязки, ввод регуляторов суммарного и разностного движений, условия и собственно настройка элементов МАСР, выполнение схемы «переворота» — внедрялись в определенном объеме вначале с использованием аналоговой техники регулирования, а затем — микропроцессорных контроллеров «Ремиконт» и «Ломиконт». В последние годы эти работы продолжены в рамках выполняемой ЗАО «Интеравтоматика» разработки и внедрения АСУ ТП энергоблоков на базе ПТК TELEPERM ME фирмы «Сименс» и ее российского аналога ТПТС51. Объектами внедрения являлись крупные энергоблоки с прямоточными пылеугольными котлами: 500 МВт Рефтинской ГРЭС (модернизация) и 800 МВт ТЭС Суйчжун в КНР (новое оборудование). На АСУ ТП энергоблока 500 МВт № 10 Рефтинской ГРЭС, где реализован уникальный для отечественного оборудования уровень автоматизации, накоплен уже четырехлетний опыт эксплуатации.

Практически все сколько-нибудь ответственные технологические операции, в том числе и при пуске из различных состояний и остановах энергоблока, выполняются автоматически. Находятся в эксплуатации и полностью автоматизированы все запрограммированные регуляторы во всех режимах все запрограммированные регуляторы (более 160) и около 80 логических программ, в том числе более 40 пошаговых. Среди них такие сложные, как пуск турбины, подключение ПВД и ПНД, пуск — останов пылесистемы, прокачка котла и т.д. В процессе работы логические программы включают — отключают ЛАСР, изменяют их структуры, управляют действиями временных программных задатчиков. Существенную роль при достижении такого уровня автоматизации сыграла реализация принципов построения МАСР, изложенных в данной статье. В системе широко использованы: ввод различных устройств компенсации, регуляторы суммарного и разностного движений и т.д. Особую важную роль оказалась реализация «переворота», внедренного в МАСР как каждой пылесистемы, так и питания топлива всего котла. В результате этого удалось обеспечить ввод в постоянную эксплуатацию всего комплекса регуляторов процесса горения, чего до этого не было сделано ни на одном аналогичном энергоблоке. Результаты внедрения данного комплекса приведены в [12].

Список литературы

1. Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. М.: Энергия, 1970.
2. Соболев О.С. Однотипные связные системы регулирования. М.: Энергия, 1973.
3. Биленко В.А., Белькинд Л.А. Применение методов оптимального управления для построения многосвязных систем регулирования энергоблоков // Энергохозяйство за рубежом. 1985. № 4. С. 14—21.
4. Система автоматического регулирования частоты и мощности ТЭС с прямоточными котлами / Н.И. Давыдов, А.Д. Мели М.Д. Трахтенберг, Л.П. Фотин // Теплоэнергетика. 1979. № 8. С. 2.
5. Анализ динамики многосвязной системы регулирования мощности и температуры энергоблока с прямоточным котлом / В.А. Биленко, Н.И. Давыдов, В.З. Чесноковский, Н.П. Росич // Теплоэнергетика. 1987. № 10. С. 11—17.
6. Биленко В.А., Миклушевич Э.Э. Выбор структуры и параметров настройки многосвязных однотипных систем регулирования энергоблоков // Теплоэнергетика. 1989. № 10. С. 21—26.
7. Rosenbrock H.H. Design of multivariable control systems the inverse Nyquist array // Proc. IEE. 1969. Vol. 116. № 11.
8. Биленко В.А., Давыдов Н.И., Чесноковский В.З. Применение смешанной автономности в многосвязных автоматических системах регулирования энергоблоков // Теплоэнергетика. 1982. № 10. С. 18—22.
9. Биленко В.А. Организация настройки многосвязных систем регулирования энергетического оборудования // Теплоэнергетика. 1990. № 11. С. 18—24.
10. Биленко В.А. Анализ условий декомпозиции задачи настройки многосвязных автоматических систем регулирования технологических процессов // Автоматизация и телемеханика. 1990. № 1. С. 145—158.
11. Биленко В.А., Давыдов Н.И. Перестроение связных контурных автоматических систем регулирования энергоблоков // Электрические станции. 1984. № 3. С. 33—36.
12. Разработка и внедрение систем регулирования основных параметров котла в составе АСУ ТП энергоблока 500 МВт Рефтинской ГРЭС / В.А. Биленко, Н.Н. Деркач, Э.Э. Миклушевич, Д.Ю. Никитский // Теплоэнергетика. 1999. № 10. С. 2—9.