

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ КРУПНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ С ПРЯМОТОЧНЫМИ КОТЛАМИ

© 2023 г. В. А. Биленко^{а, *}, И. В. Тузов^а, Д. Ю. Никольский^а

^аАО «Интерматик», ул. Ленинская Слобода, д. 21, стр. 1, Москва, 115280 Россия

*e-mail: bilenko@intermatic.energy

Поступила в редакцию 16.11.2022 г.

После доработки 13.12.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

Данная работа отражает многолетний опыт разработки и внедрения автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) на традиционных энергоблоках мощностью от 300 до 800 МВт. Она является частью цикла статей, посвященных многосвязным системам автоматического регулирования, их развитию в соответствии с современными требованиями к поддержанию частоты и мощности энергосистемы. Подробно описаны взаимосвязи основных контуров автоматического регулирования энергоблоков и способы нейтрализации негативных взаимосвязей между ними. Рассмотрены задачи регулирования частоты и мощности энергоблоков, решение энергосистемных задач. Представлена упрощенная матрица объекта управления энергоблоком. Приведены три вида автономности (автономность I, II и III) и взаимосвязи основных ведущих и ведомых режимных параметров работы энергоблока. Показаны преимущества комбинированного варианта реализации системы автоматического управления мощностью (САУМ), позволяющей использовать каждое технологическое решение вне зависимости от текущего режима работы энергоблока. Подробно описан способ нейтрализации взаимосвязей между локальными автоматическими системами регулирования (ЛАСР) как в структуре САУМ-1, так и в комбинированной САУМ путем включения устройств компенсации с реализацией инвариантности основных регулируемых величин при возмущениях работы котла. Разработаны и усовершенствованы методы, позволяющие улучшить динамику регулирования важных технологических параметров. Разработанные структурные решения по автоматизации оборудования получили широкое распространение при внедрении распределенных автоматизированных систем управления. Приведены схемы основных каналов автоматического регулирования рассматриваемых в статье энергоблоков, в процессе наладки АСУ ТП которых были получены положительные результаты. Реализация оптимальных параметров настройки основных контуров регулирования обеспечивает повышение качества процессов регулирования энергоблока в целом.

Ключевые слова: питатели сырого угля, пылеугольные энергоблоки, газомазутные энергоблоки, технологические группы регуляторов энергоблока, система автоматического регулирования, структурная схема

DOI: 10.56304/S0040363623110024

Настоящая статья – третья в цикле из четырех статей, посвященных анализу результатов разработки и внедрения в 2000–2015 гг. более 30 проектов автоматизации крупных энергоблоков мощностью 300, 500 и 800 МВт с прямоточными котлами, важной целью которых являлось обеспечение выполнения современных энергосистемных требований по общему (ОПРЧ) и нормированному (НПРЧ) первичному регулированию частоты и мощности в энергосистеме. В первой статье [1] был проведен сравнительный анализ двух вариантов построения системы автоматического регулирования частоты и мощности энергосисте-

мы (САРЧМ): системы автоматического управления мощностью САУМ-1 (турбина следует за котлом) и САУМ-2 (котел следует за турбиной). В ней были продемонстрированы преимущества комбинированного варианта их реализации, позволяющего использовать как каждое из этих решений, так и их объединенную структуру с возможностью применения любого из них в зависимости от текущего режима работы энергоблока. Кроме того, было показано, что наряду с необходимостью точно поддерживать частоту и мощность требуется не допускать ощутимого отклонения давления пара.

В [2] был проведен анализ результатов внедрения АСУ ТП на 29 крупных традиционных энергоблоках мощностью 300, 500 и 800 МВт, реконструированных в целях обеспечения выполнения на них современных энергосистемных требований общего и нормированного первичного регулирования частоты. Было предложено укрупненное представление структуры АСУ ТП энергоблоков как объектов регулирования частоты и мощности в виде пяти технологических групп с подробным описанием работы каждой из них как функциональной составляющей АСУ ТП энергоблока. Анализ был выполнен для энергоблоков мощностью 800 МВт с прямоточными пылеугольными и газомазутными котлами [2].

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В настоящей статье иллюстрируются взаимосвязи основных контуров регулирования САРЧМ при использовании различных принципов построения САУМ и методы решения задачи инвариантности контуров регулирования. Базовым средством для ее решения были выбраны предложенные в [2] укрупненные структурные схемы основных регуляторов энергоблоков для пылеугольных и газомазутных котлов.

Котельный агрегат в целом и его основные технологические параметры (расходы воды, пара, топлива и воздуха, температуры пара, газов, поверхностей нагрева, давление пароводяной среды и т.д.) являются наряду с характеристиками турбины важнейшими технологическими показателями работы оборудования энергоблока как объекта регулирования частоты и мощности. Поэтому было бы явно недостаточно ограничиваться анализом влияния только мощности энергоблока и давления пара перед турбиной на его динамические характеристики, как это делается в некоторых исследованиях.

Важнейшим фактором при решении подобной задачи наряду с регулированием собственно ча-

стоты и мощности является организация температурного режима работы котла. Упрощенная матрица объекта управления энергоблоком в части рассматриваемых задач показана на рис. 1.

Специалисты АО «Интерматик» получили большой опыт при модернизации существующих и создании новых крупных пылеугольных и газомазутных энергоблоков России, оснащаемых современными полномасштабными АСУ ТП. Для выполнения требований ОПРЧ и НПРЧ по обеспечению быстрой реакции на значительные возмущения частоты сети были разработаны и испытаны методы, позволяющие в целях улучшения динамики энергоблока ускорять регулирование важных теплотехнических параметров, таких как температура и давление свежего пара, расход питательной воды и топлива в котел, расходы первичного и вторичного воздуха.

В качестве примеров можно привести список объектов, на которых были получены положительные результаты в процессе наладки АСУ ТП энергоблоков с последующими сертификационными испытаниями на соответствие нормам ОПРЧ и НПРЧ, а также хорошо зарекомендовавших себя за время дальнейшей эксплуатации. В частности, речь идет о пылеугольных моноблоках 800 МВт Березовской ГРЭС, сертифицированных на соответствие требованиям НПРЧ, а также о пылеугольных моноблоках 500 МВт № 7–10 и пылеугольном дубль-блоке 300 МВт № 5 Рефтинской ГРЭС, успешно прошедших испытания на соответствие требованиям ОПРЧ. Важно подчеркнуть, что нормы участия генерирующего оборудования в НПРЧ изначально проходили экспериментальную проверку только на газомазутных энергоблоках, что обусловило специфику некоторых требований к динамическим характеристикам объектов регулирования. Березовская ГРЭС является в настоящее время единственной пылеугольной электростанцией в России, все энергоблоки которой получили сертификаты соответствия требованиям НПРЧ.

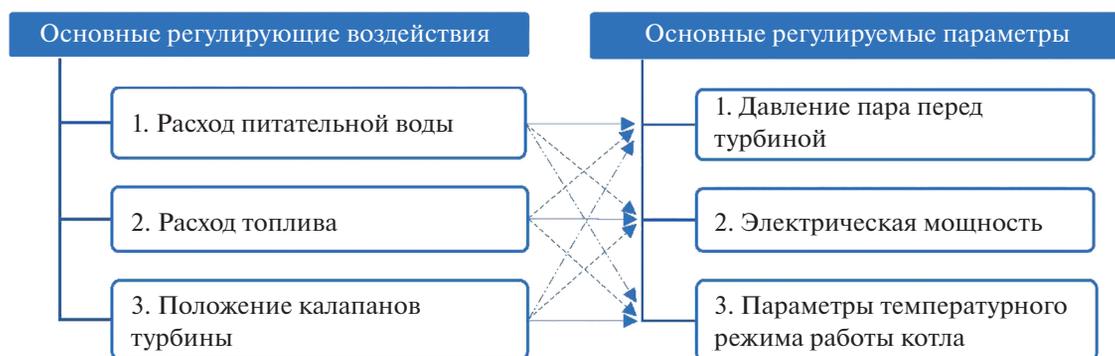


Рис. 1. Матрица объекта управления энергоблоком

Для начала следует рассмотреть взаимосвязи основных ведущих и ведомых режимных параметров работы энергоблока. На рис. 1 основные регулирующие воздействия условно разделены на три группы: расход питательной воды в котел, расход топлива, положение клапанов паровой турбины. Более мелкие системы, такие, например, как регулирование расходов первичного или вторичного воздуха, дополнительно не представлены, поскольку их работа находится в прямой зависимости от расходов топлива и воды.

Эти регулирующие воздействия оказывают воздействие на три важных технологических параметра: мощность энергоблока, давление пара перед турбиной и температурный режим работы котла. Например, связь 3–2 является самой быстродействующей из всех, влияние положения клапанов турбины на мощность энергоблока очень быстрое. Казалось бы, то же самое должно быть и в связи 3–1, но давление пара перед турбиной может сильно отличаться от давления пара за котлом вследствие большой протяженности трубопроводов. Котельные защиты по повышению давления пара реализуются именно по датчикам на основном трубопроводе вблизи быстродействующей редуциционно-охладительной установки, и поэтому иногда приходится проектировать регулирование давления по котельным датчикам, а в такой схеме инерция связи 3–1 будет более заметна, чем в схеме со связью 3–2.

Расходы питательной воды и топлива однозначно определяют температурный режим работы котла: при повышении расхода топлива увеличивается температура пара по тракту, а при повышении расхода воды она уменьшается. Таким образом, существует еще одна условная связь между расходами воды и топлива. На пылеугольных котлах это, как правило, зависимость расхода топлива от заданного расхода воды, а на газомазутных котлах обычно наоборот — зависимость расхода воды от заданного расхода топлива. Связи 1–3 и 2–3 воздействуют на температуру с разной скоростью, хотя эта разница и не заметна в обычном режиме работы энергоблока, но при больших скачках мощности, при одновременном изменении расходов воды и топлива температура по тракту может значительно отклоняться от заданной. В схемах регулирования используются динамические преобразователи (устройства компенсации), которые при необходимости корректируют скорость изменения требуемых расходов воды и топлива.

Связи 1–1, 2–1, 1–2, 2–2 можно рассматривать как единое целое, так как расходы связаны между собой и изменяются в строгой зависимости один от другого. Эту зависимость определяет автоматическая система регулирования (АСР) температурного режима работы котла. Различие температур по тракту котла, особенно при пере-

ходных процессах на энергоблоке, может быть довольно существенным. Влияние расходов топлива и воды на мощность и давление пара — самая инерционная связь, которая представляет основную сложность для настройки АСР и проведения испытаний на соответствие нормам участия энергоблоков в ОПРЧ/НПРЧ. По отдельности расходы топлива и питательной воды тоже оказывают влияние на мощность и давление, поэтому при коррекции температурного режима в схеме предусматривается компенсация взаимного влияния (“развязка”) этих контуров регулирования.

Наименее выраженной является связь 3–3 — влияние положения клапанов турбины на температурный режим котла. Причина состоит в том, что понятие “температурный режим котла”, как характеристика регулируемого параметра, не совсем четкое, так как здесь нужно говорить о группе параметров температуры по всему тракту котла.

В итоге имеется сложная многосвязная система автоматического регулирования. В этой системе совместное эффективное регулирование параметров настройки возможно только в сложной схеме, в рамках которой синхронная работа АСР подкреплена функциональными зависимостями и развязками между контурами регулирования для соответствия технологическому режиму работы котла и турбины и энергоблока в целом. Также необходимо иметь в виду установленные технологические ограничения оборудования и предусматривать совместную работу регуляторов таким образом, чтобы не допускать срабатывания защит при сильных возмущениях системы. Для этого устанавливаются соответствующие диапазоны работы АСР, в некоторых случаях предусматривается ввод стерегущих регуляторов при достижении допустимых границ отклонения параметров объекта.

Представленные далее методы повышения эффективности АСР реализованы на всех перечисленных энергоблоках, что позволило успешно бороться с термодинамической инерцией котлов — основной проблемой при испытаниях “на скорость”.

Как следует из рассмотренных задач, весьма значимой среди них является обеспечение автономности — независимости функционирования наиболее важных контуров автоматического регулирования: мощности энергоблока и давления пара перед турбиной, расходов топлива и питательной воды, эффективного поддержания температурного режима работы оборудования и т.д. Они должны надежно функционировать во всем диапазоне рабочих нагрузок энергоблока и при необходимости быть автоматически адаптированы к возможным нарушениям режимов работы оборудования.

Разработанные структурные решения по автоматизации рассматриваемого типа оборудования начали частично использовать еще в конце XX в. при реализации АСР на применявшихся тогда традиционных средствах и автономных микропроцессорных контроллерах, а затем они получили широкое распространение при внедрении распределенных автоматизированных систем управления технологическими процессами на базе программируемой микропроцессорной техники.

АВТОМАТИЗАЦИЯ МНОГОСВЯЗНОЙ АСР МОЩНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ЭНЕРГБЛОКА 300 МВт

На рис. 2 показана структурная схема многосвязной АСР мощности и температуры ранее типового (1990–2000 гг.) для российской энергетики энергоблока 300 МВт, например энергоблока № 3 с пылеугольным прямоточным котлом Каширской ГРЭС. Для упрощения изложения приводится однокорпусная модель реального котла.

В правой части рисунка представлена схема объекта регулирования с размещением в ней необходимых для анализа рассматриваемой задачи регулирующих органов и регулируемых параметров. В левой части рисунка показана укрупненная схема алгоритмов управления.

Многосвязная АСР проекта состоит из двух двухконтурных систем регулирования:

АСР мощности энергоблока (нижняя часть рисунка);

АСР температурного режима котла с основным сигналом по температуре пара перед первым регулируемым впрыском (верхняя часть рисунка).

Автоматическая система регулирования мощности энергоблока включает в себя собственно регулятор мощности, входным сигналом которого служит небаланс заданной $N_{\text{здн}}$ и полученной фактической N^* мощностей энергоблока. Выходным сигналом АСР мощности является заданный расход питательной воды W . Автоматическая система регулирования температуры пара обеспечивает температурный режим работы котла по всему пароводяному тракту. Реализуется она по двухконтурной схеме с основным сигналом по температуре пара в зоне уверенного перегрева и опережающим скоростным сигналом по излучению факела в верхней части топки Φ .

Каждый из основных регулирующих органов энергоблока в процессе своей работы оказывает влияние на другие регулируемые параметры. Поэтому между локальными автоматическими системами регулирования возникают связи, объединяющие их в сложные многосвязные АСР, характеризующиеся возможностью возник-

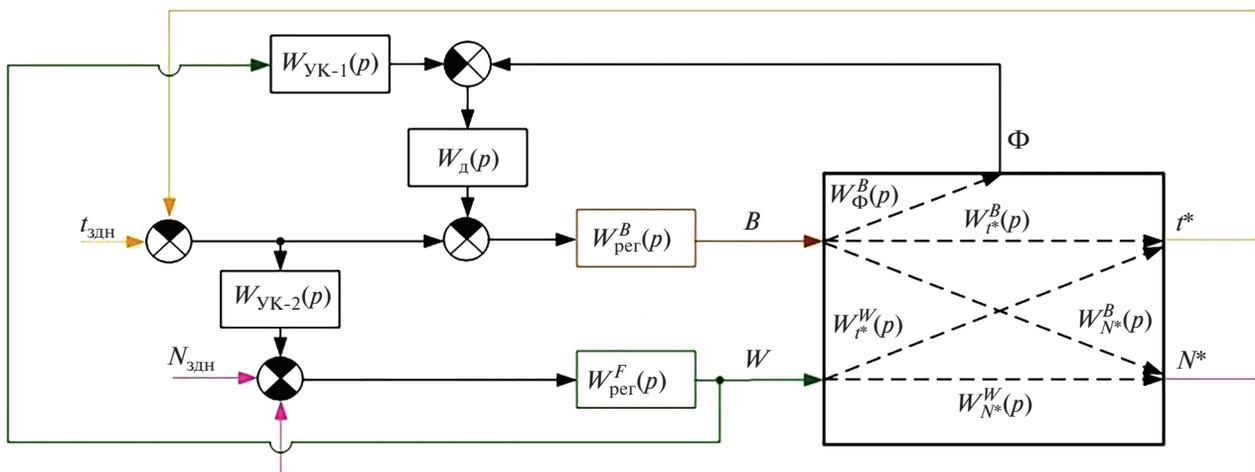


Рис. 2. Расчетная структурная схема многосвязной АСР мощности и температуры однокорпусного пылеугольного энергоблока.

$t_{\text{здн}}$ – заданная температура; $N_{\text{здн}}$ – заданная мощность энергоблока; $W_{\text{ук-1}}(p)$ – устройство компенсации влияния изменения расхода питательной воды на температуру; $W_{\text{ук-2}}(p)$ – устройство компенсации влияния коррекции расхода топлива на мощность энергоблока; $W_{\text{д}}(p)$ – дифференциатор; $W_{\text{рег}}^B(p)$ – котельный регулятор топлива; B – задание суммарной частоты вращения лент питателей сырого угля; W – задание суммарного расхода питательной воды; $W_{\text{рег}}^F(p)$ – котельный регулятор мощности; $W_{\Phi}^B(p)$, $W_{i^*}^B(p)$, $W_{N^*}^B(p)$, $W_{i^*}^W(p)$, $W_{N^*}^W(p)$, $W_{\Phi}^W(p)$ – прямые и перекрестные связи; Φ – излучение факела; i^* – температура, характеризующая тепловой режим работы котла; N^* – активная электрическая мощность энергоблока; p – оператор Лапласа

новения колебательных процессов. Для их устранения был предложен и внедрен метод смешанной автономности, ориентированный на нейтрализацию “вредных” перекрестных связей между каналами регулирования путем развязки собственных движений многосвязной системы регулирования и сведения процесса ее настройки к последовательным операциям без использования итерационных процедур [3, 4].

РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМЫ ПОЛНОЙ АВТОНОМНОСТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ АСР МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА

Регулятор мощности энергоблока воздействует на задание по расходу питательной воды (отрабатываемое регулятором питания) на основе небаланса между заданной и фактической мощностями энергоблока. Регулятор температуры пара воздействует на подачу топлива (регулирующее и возмущающее воздействия по топливу B). На него подаются основной сигнал по небалансу между заданной $t_{\text{здн}}$ и фактической t^* обобщенными температурами пара (под обобщенной температурой подразумевается комбинация сигналов по температуре пара по тракту котла, инвариантная к возмущениям клапанами турбины) и дополнительный скоростной сигнал, формируемый дифференциатором $W_d(p)$.

Для нейтрализации нежелательных перекрестных связей через объект регулирования используются:

автономность I — обеспечивает инвариантность регулируемых величин одной ЛАСР к изменениям регулирующих воздействий других ЛАСР;

автономность II — обеспечивает инвариантность регулирующих органов одной ЛАСР к изменениям регулирующих воздействий других ЛАСР.

Основными каналами управления рассматриваемым объектом являются регулирование мощности энергоблока и температуры пара. Именно для обеспечения эффективности решения этих задач разработаны алгоритмы “помощи” данным каналам благодаря реализации принципов автономности. “Помощь” первому из них (каналу регулирования мощности энергоблока) реализуется устройством компенсации (УК-1) для подачи команды изменения мощности энергоблока с выхода регулятора мощности W через каналы устройства $W_{\text{УК-1}}(p)$, дифференциатора $W_d(p)$, регулятора топлива $W_{\text{рег}}^B(p)$, что обеспечивает требуемое воздействие на регулятор подачи топлива.

На вход дифференциатора подается разность сигналов по излучению факела Φ и заданному расходу питательной воды, преобразованному в

устройстве компенсации $W_{\text{УК-1}}(p)$. Последний настраивается согласно условиям реализации автономности I от регулятора мощности к регулятору температуры. Это означает, что при правильной настройке изменения $N_{\text{здн}}$ не должны вызывать отклонения t^* . При неточном соблюдении этого условия не удастся полностью нейтрализовать проявление взаимосвязей между рассматриваемыми ЛАСР вследствие того, что перекрестная связь в объекте $W_{N^*}^B(p)$ преобладает над прямой связью $W_{N^*}^W(p)$. Это потребовало “загрубления” параметров настройки инерционного контура ЛАСР температуры, т.е. снижения качества отработки топливных возмущений, не полностью “перехватываемых” сигналом по излучению факела.

Для устранения указанного недостатка и снижения требований к точности настройки $W_{\text{УК-1}}(p)$

было решено нейтрализовать связь $W_{N^*}^B(p)$ путем реализации автономности II от ЛАСР температуры к ЛАСР мощности, т.е. осуществить в рассматриваемой системе смешанную автономность. Структура и настройки вводимого при этом устройства компенсации $W_{\text{УК-2}}(p)$ должны быть выбраны таким образом, чтобы его выходной сигнал компенсировал изменение N^* при возмущении подачей топлива. Идеальная передаточная функция этого устройства может быть представлена в виде

$$W_{\text{УК-2 ид}}(p) = W_{N^*}^B(p) / W_{t^*}^B(p).$$

Практически устройство $W_{\text{УК-2}}(p)$ можно реализовать так же, как и $W_{\text{УК-1}}(p)$, в виде интегро-дифференцирующего звена, но не инерционного, а форсирующего, ввиду того что на возмущение подачей топлива температурный сигнал t^* реагирует с большей инерционностью, чем на возмущение мощностью N^* :

$$W_{\text{УК}}(p) = k_{\text{УК}} \frac{1 + T'_{\text{УК}} p}{1 + T''_{\text{УК}} p},$$

где $k_{\text{УК}}$ — коэффициент пропорциональности; $T'_{\text{УК}} - T''_{\text{УК}} = T_{\text{УК}}$ — постоянная времени УК; $\alpha_{\text{УК}} = T'_{\text{УК}} / T''_{\text{УК}}$ — соотношение постоянных времени интегродифференцирующего звена УК.

Особо неприятно ситуация выглядит при существенном ухудшении характера топочного процесса в связи с переходом на уголь более низкого качества.

Возможность реализации в новой АСР оптимальных параметров настройки инерционного контура ЛАСР температуры по сравнению с их “загрубленными” значениями в исходной схеме позволяет заметно улучшить качество поддержания температуры, особенно при внешнем возму-

шении. В результате действия УК-2 регулятор мощности при топочных возмущениях практически не вступает в работу. Это ухудшает качество поддержания мощности, но во много раз уменьшает отклонение расхода питательной воды при топочных возмущениях. Переходные процессы при возмущении заданной мощностью в сравниваемых вариантах оказываются достаточно близкими [3, 4].

РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМЫ СМЕШАННОЙ АВТОНОМНОСТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ АСР МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА, ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА В КОМБИНИРОВАННОЙ САУМ

Ранее был рассмотрен пример реализации САУМ-1, в которой АСР турбины, изменяя положение регулирующих клапанов, поддерживает заданное давление пара перед турбиной. Регулирование мощности энергоблока в САУМ-1 осуществляется почти исключительно регуляторами нагрузки котла. При этом скорость реакции на возмущения в контуре регулирования давления пара намного выше, чем в контуре регулирования мощности энергоблока, и в такой системе нет необходимости рассматривать влияние отклонения положения регулирующих клапанов турбины на мощность или температуру пара, как и отклонение давления пара, так как между

инерционным контуром мощности и быстрым контуром регулирования давления нет сильной взаимосвязи, которая может привести к резонансным колебаниям всей системы.

При современных нормах участия тепловых энергоблоков в ОПРЧ и НПРЧ и требованиях к динамике регулирования мощности энергоблока важной является задача гораздо более быстрого изменения его нагрузки, с чем САУМ-1 не может справиться. Для этого на современных энергоблоках используется комбинированная САУМ, в которой регулирование мощности энергоблока и давления пара совместно осуществляется как турбинным, так и котельным регуляторами мощности-давления.

Структурная схема многосвязной АСР мощности, давления и температуры типового в нынешней российской энергетике энергоблока 300 или 800 МВт, например энергоблока № 5 Рефтинской ГРЭС или любого энергоблока Березовской ГРЭС с пылеугольным прямоточным котлом, показана на рис. 3. Реальный котел также может быть как однокорпусным, так и двухкорпусным.

Многосвязная АСР рассматриваемого проекта состоит из трех контуров АСР:

АСР мощности энергоблока (нижняя часть рисунка) условно одноконтурная;

АСР давления свежего пара (средняя часть рисунка) условно двухконтурная;

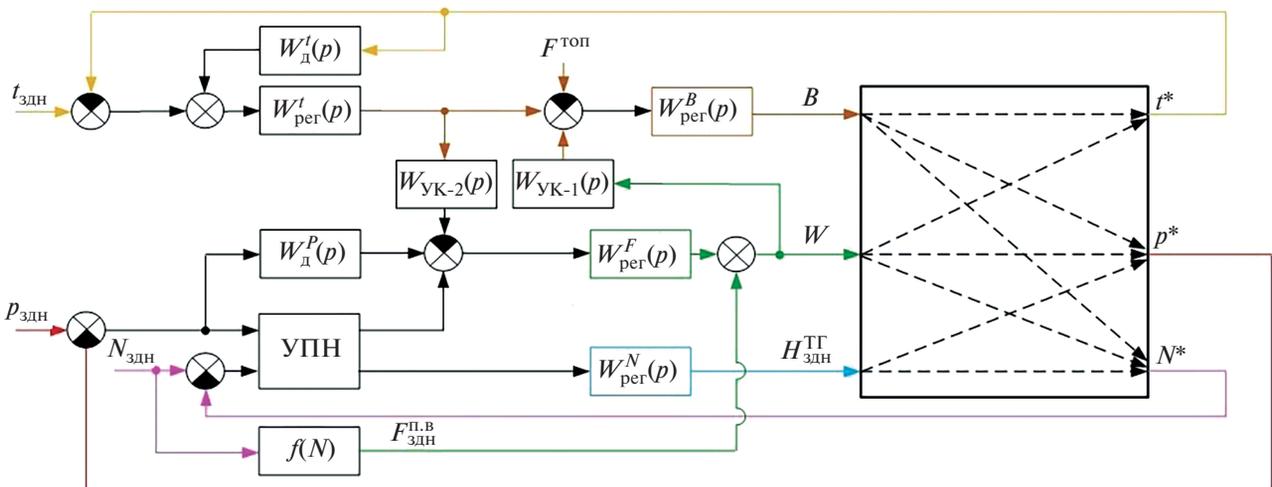


Рис. 3. Структурная схема многосвязной АСР мощности, давления и температуры пылеугольного энергоблока.

$p_{здн}$ – заданное давление свежего пара; $W_d^t(p)$, $W_d^P(p)$ – дифференциатор; $W_{пер}^t(p)$ – корректор температурного режима; УПН – устройство преобразования небалансов мощности и давления; $f(N)$ – функция преобразования заданной мощности в задание расхода воды; $F^{топ}$ – текущий расход топлива; $F_{здн}^{п.в}$ – задание расхода питательной воды; $H_{здн}^{ТГ}$ – задание положения регулирующих клапанов турбогенератора; p^* – давление свежего пара; $W_{пер}^N(p)$ – турбинный регулятор мощности и давления; остальные обозначения см. рис. 2

АСР температурного режима котла с основным сигналом по температуре пара перед первым регулируемым впрыском (верхняя часть рисунка) может быть двух- или трехконтурной в зависимости от количества использованных опережающих сигналов по температуре.

Небаланс мощности энергоблока, образованный заданной $N_{\text{здн}}$ и фактической N^* мощностями, и небаланс давления свежего пара, который сформирован заданным $p_{\text{здн}}$ и фактическим p^* давлениями, должны рассматриваться в составе обеих АСР мощности и давления как координированная система с изменяемой долей небалансов турбинного и котельного регуляторов для обеспечения необходимого качества регулирования электрической мощности и давления свежего пара. Изображенный на рис. 3 блок УПН позволяет перераспределять небалансы мощности и давления, а соответственно, и резонансные частоты контуров регулирования. Взаимосвязь этих контуров в такой системе подтверждена испытаниями в процессе выполнения наладочных работ. Следовательно, необходимо рассматривать три регулирующих воздействия и три основных параметра регулирования. Взаимосвязей также становится в несколько раз больше. Для развязки контуров ЛАСР и обеспечения инвариантности используются три различных устройства компенсации.

Для обеспечения необходимой скорости изменения нагрузки энергоблока в контуре регулирования мощности в большей степени задействованы регулирующие клапаны турбины, а изменение давления пара осуществляется главным образом котельными регуляторами.

Как и в предыдущем варианте САУМ-1, в такой системе предусмотрена компенсация влияния расхода питательной воды W на температуру пара t^* в устройстве $W_{\text{УК-1}}(p)$, влияния расхода топлива B на давление пара p^* в устройстве $W_{\text{УК-2}}(p)$.

Отличием для комбинированной САУМ является компенсация отклонения положения регулирующих клапанов турбогенератора $H_{\text{здн}}^{\text{ТГ}}$ на давление пара. Для устранения указанного недостатка и снижения требований к точности настройки было решено нейтрализовать связь $H_{\text{здн}}^{\text{ТГ}}$ с давлением пара реализацией автономности III от ЛАСР мощности к ЛАСР давления, выполненной в качестве предвключенного дифференциатора с небалансом давления свежего пара на его входе. Настройки вводимого при этом устройства компенсации $W_{\text{д}}(p)$ должны выбираться таким образом, чтобы его выходной сигнал компенсировал изменения p^* при возмущении изменением положения регулирующих клапанов турбины.

В данной системе отсутствуют опережающие сигналы по излучению факела, так как на некото-

рых котлах, в связи с особенностью места их расположения, необходимость установки датчиков указанных типов отсутствует.

При формировании входного небаланса корректирующего регулятора температуры $W_{\text{пер}}^t(p)$ используется динамическое преобразование 1, 2 или 3-го порядка $W_{\text{д}}^t(p)$ от опережающих сигналов по температуре пара по тракту котла.

Важной особенностью предложенного решения является и наличие так называемого “прямого канала” установки заданного расхода питательной воды W в зависимости от требуемой нагрузки энергоблока. Прямой канал обеспечивает большее быстродействие котла, а $W_{\text{пер}}^F(p)$ выступает в качестве корректора соотношения “мощность – расход воды”.

Схема на рис. 3 является укрупненной и не содержит более мелких узлов, таких как регуляторы температур по тракту котла, форсировки, регуляторы воздуха и разрежения в топке котла, которые также находятся в зависимости от основных регулирующих воздействий и влияют на основные технологические параметры энергоблока.

ВЫВОДЫ

1. Способ нейтрализации взаимосвязей между ЛАСР энергоблока как в структуре схем САУМ-1, так и в комбинированной САУМ путем включения устройств компенсации между ними обеспечивает в одном направлении инвариантность основных регулируемых величин или регулирующих органов при возмущениях, приложенных к другим ЛАСР (автономность I, II, III).

2. Предложенный способ, названный смешанной автономностью, обеспечивает компенсацию наиболее значимых перекрестных связей объекта регулирования даже при грубой настройке устройств компенсации, реализующих автономность, и позволяет свести процесс настройки многосвязной АСР к последовательным операциям без использования итерационных процедур.

3. Реализация предложенного способа в многосвязной АСР мощности-давления и температуры энергоблоков 300–800 МВт с прямоточным пылеугольным котлом позволила достичь оптимальных параметров настройки АСР энергоблока и тем самым обеспечить повышение качества процессов регулирования, включая выполнение требований по общему и нормированному первичному регулированию частоты и мощности в энергосистеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Биленко В.А., Жигунов В.В.** Сравнительный анализ динамических свойств вариантов систем автоматического регулирования частоты и мощности паросиловых энергоблоков с прямоточными котлами // Теплоэнергетика. 2018. № 4. С. 5–20. <https://doi.org/10.1134/S004036361804001X>
2. **Биленко В.А., Тузов И.В., Никольский Д.Ю.** Усовершенствование структурных схем АСР крупных паросиловых энергоблоков для обеспечения выполнения ими требований ОПРЧ и НПРЧ // Теплоэнергетика. 2022. № 3. С. 20–30. <https://doi.org/S0040363622030031>
3. **Биленко В.А., Давыдов Н.И., Чесноковский В.З.** Применение смешанной автономности в многосвязных автоматических системах регулирования энергоблоков // Теплоэнергетика. 1982. № 10. С. 18–22.
4. **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.**

Experience in the Development and Implementation of Modern Systems of Automatic Frequency and Power Control of Large Power Units with Direct-Flow Boilers

V. A. Bilenko^{a, *}, I. V. Tuzov^a, and D. Yu. Nikolsky^a

^a AO Intermatic, Moscow, 115280 Russia

*e-mail: bilenko@intermatic.energy

Abstract—This work reflects many years of experience in the development and implementation of an automated process control system at traditional power units with a capacity of 300 to 800 MW. It is part of a series of articles devoted to multiply connected automatic control systems, their development in accordance with modern requirements for maintaining the frequency and power of the power system. The interrelations of the main circuits of automatic control of power units and ways to neutralize the negative interrelations between them are described in detail. The problems of regulating the frequency and power of power units and solving power system problems are considered. A simplified matrix of the power unit control object is presented. Three types of autonomy (autonomy I, II, and III) and the relationship between the main leading and driven operating parameters of the power unit are considered. The advantages of the combined variant of the implementation of the automatic power control system (APCS) are shown, which makes it possible to use each technological solution regardless of the current mode of operation of the power unit. A method for neutralizing the interconnections between local automatic control systems (LACS) both in the APCS-1 structure and in the combined APCS is described in detail by switching on compensation devices with the implementation of the invariance of the main controlled variables during disturbances in the boiler's operation. Methods have been developed and improved to improve the dynamics of regulation of important technological parameters. The developed structural solutions for equipment automation are widely used in the implementation of distributed automated control systems. The schemes of the main channels of automatic control of the power units considered in the article are given, in the process of adjusting the process control systems of which positive results were obtained. The implementation of the optimal settings for the main control loops ensures an increase in the quality of the control processes of the power unit as a whole.

Keywords: raw coal feeders, pulverized coal power units, oil-gas power units, technological groups of power unit regulators, automatic control system, block diagram