

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.181.6

КУХОРЕНКО
Александр Николаевич

**ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ
В БАРАБАНЕ ПАРОВЫХ КОТЛОВ И ПАРОГЕНЕРАТОРОВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

Минск 2019

Научная работа выполнена в Государственном учреждении образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

Научный руководитель **Кулаков Геннадий Тихонович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **Дудкин Александр Арсентьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией идентификации систем Государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»


Кузьмицкий Иосиф Фелицианович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехники» учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация Проектное научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие «Белнипиэнергопром»

Защита состоится 14 марта 2019 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Автореферат разослан «11» февраля 2019 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент

 М. П. Ревотюк

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение в области автоматизации теплоэнергетических процессов ТЭС и АЭС получили типовые трехимпульсные системы автоматического управления (САУ). В результате их широкого распространения возникает проблема «технического противоречия» между быстродействием и устойчивостью системы. Существующие САУ уровнем воды в барабане котла и их модификации, получившие широкое распространение на ТЭС и АЭС, при значительных изменениях нагрузки оказались недостаточно эффективными. Увеличение паропроизводительности котлов, параметров перегретого пара на выходе последних, а также необходимость работы котлов в пиковой и полупиковой части электрических нагрузок энергосистемы актуализирует проблему существенного повышения качества управления уровнем воды в барабане во всем диапазоне изменения нагрузок теплоэнергетических объектов при глубоких возмущениях.

Диссертационная работа посвящена задаче существенного повышения качества управления уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов на основе аналитических экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации комбинированных САУ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнена в Государственном учреждении образования «Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь» в рамках проведения научных исследований и разработок: Государственной научно-технической программы на 2011–2015 годы «Разработка и внедрение средств и технологий для развития Государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (ГНТП «Защита от чрезвычайных ситуаций»); Государственной программы научных исследований на 2011–2015 годы «Научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций КИИ МЧС», ее автор привлекался к выполнению НИР (ГБ-1311-212) на 2012–2016 годы «Повышение эффективности ТЭС в условиях рыночной экономики и ввода генерирующих мощностей» на этапе «Разработка оптимальных систем автоматического регулирования для объектов без самовыравнивания ТЭС и АЭС» кафедры «Тепловые электрические станции» БНТУ.

Тема диссертации соответствует целям и задачам республиканских программ в области энергетики и энергосбережения: перечню приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы по разделу «Энергообеспечение, энергосбережение, энергоэффективность, энергоэффективные технологии», утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585; приоритетному направлению научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы «Энергетика», утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190, а также Комплексному прогнозу научно-технического прогресса Республики Беларусь на 2012–2025 годы и на период до 2040 года по направлению «Энергетика будущего».

Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является разработка высококачественных комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС, позволяющих существенно улучшить качество регулирования и повысить эффективность работы ТЭС и АЭС в широком диапазоне изменения нагрузок.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать аналитические экспресс-методы структурно-параметрической оптимизации САУ для объектов без самовыравнивания высокой динамической точности.

2. Разработать математическую модель оценки качества переходных процессов САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС на частичный и полный сброс нагрузки котла без проведения натурных испытаний систем.

3. Разработать комбинированные САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС с учетом ограничения максимальной величины регулирующего воздействия для работы в широком диапазоне изменения нагрузок и методику их параметрической оптимизации.

4. Разработать методику автоматической корректировки параметров динамической настройки комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов в зависимости от нагрузки, скорости изменения уровня воды в барабане при пуске и начального теплового состояния.

5. Разработать методику оценки влияния изменения качественных характеристик переходных процессов комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов на показатели безопасности, надежности, долговечности и экономичности работы теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС.

Объект исследования: автоматизированный технологический участок питания барабанного парового котла, содержащий питательный тракт, котел и паропроводы к турбине с необходимыми системами контроля, автоматической защиты и управления.

Предмет исследования: подсистема автоматического управления уровнем воды в барабане парового котла и парогенератора.

Научная новизна

1. Разработаны аналитические экспресс-методы структурно-параметрической оптимизации САУ для объектов без самовыравнивания, учитывающие структуру и динамику объектов и критерии качества управления, позволяющие создавать комбинированные системы управления.

2. Разработана математическая модель оценки качества переходных процессов САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС на частичный и полный сброс нагрузки котла на основе экспериментальных динамических характеристик объекта управления без проведения натурных испытаний систем.

3. Разработаны четыре варианта схем комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС, учитывающие максимальную величину управляющего воздействия, а также методика их параметрической оптимизации.

4. Разработана методика автоматической корректировки параметров динамической настройки комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов в зависимости от нагрузки, скорости изменения уровня воды в барабане при пуске и начального теплового состояния.

5. Разработана методика оценки влияния изменения качественных характеристик переходных процессов комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов на показатели безопасности, надежности, долговечности и экономичности работы теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС.

Положения, выносимые на защиту

1. Аналитические экспресс-методы структурно-параметрической оптимизации САУ для объектов без самовыравнивания, отличающиеся от известных учетом максимально допустимых величин корректирующих и регулирующих воздействий при отработке задающего воздействия по основной и промежуточной управляемым величинам, а также высоким качеством переходных процессов, позволяющие повысить безопасность, надежность,

долговечность и экономичность работы ТЭС и АЭС в широком диапазоне изменения нагрузок.

2. Математическая модель оценки качества переходных процессов САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС на частичный и полный сброс нагрузки котла, основанная на экспериментальных динамических характеристиках объекта управления по каналу регулирующего воздействия и возмущения расходом перегретого пара, позволяющая без проведения натурных испытаний проверять работоспособность системы и уточнять уставки срабатывания технологических защит по уровню воды в барабане парового котла или парогенератора.

3. Четыре варианта схем комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС, отличающиеся как выделением эквивалентного внешнего возмущения, так и его непосредственным измерением, учетом ограничения максимальной величины регулирующего воздействия при возмущении расходом перегретого пара и методика их параметрической оптимизации, что позволяет получить высокое качество поддержания уровня воды в барабане в широком диапазоне изменения нагрузок, включая пусковые режимы.

4. Методика автоматической корректировки параметров динамической настройки комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов в зависимости от нагрузки, скорости изменения уровня воды в барабане при пуске и начального теплового состояния, позволяющая сохранить высокое качество регулирования в широком диапазоне изменения нагрузок.

5. Методика оценки влияния изменения качественных характеристик переходных процессов комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов на показатели безопасности, надежности, долговечности и экономичности, учитывающая ущерб не только от внезапных, но и постепенных отказов, а также аварий, позволяющая оценить технико-экономическую эффективность их внедрения на объектах ГПО «Белэнерго».

Личный вклад соискателя ученой степени

Совместно с руководителем диссертационной работы доктором технических наук, профессором Г. Т. Кулаковым определены цель и задачи исследований. Личный вклад соискателя заключается в разработке аналитических экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации САУ для объектов без самовыравнивания; разработке математической модели оценки качества переходных процессов САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС на частичный и полный сброс нагрузки котла без проведения натурных испытаний; разработке четырех комбинированных САУ

уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС без измерения возмущений и с измерением наиболее опасных из них, а также методики автоматической корректировки параметров динамической настройки комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов в зависимости от нагрузки; разработке методики оценки влияния изменения качественных характеристик переходных процессов комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов на показатели безопасности, надежности, долговечности и экономичности теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты исследований диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: II Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» (Минск, 2013); 67-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и магистрантов кафедры «Тепловые электрические станции» БНТУ (Минск, 2014); VIII Международная научно-практическая конференция молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) (Минск, 2014); III Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» (Минск, 2015); 68-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и магистрантов кафедры «Тепловые электрические станции» (Минск, 2015); I Международная научно-техническая конференция «Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС» (Минск, 2015); Международная научная конференция «Информационные технологии и системы» (ИСТ 2018) (Минск, 2018). Результаты исследований используются в образовательном процессе Белорусского национального технического университета в составе курса лекций по теории автоматического управления специальностей: 1-53 01 04 «Автоматизация и управление теплоэнергетическими процессами»; 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств (энергетика)»; 1-43 01 08 «Тепловая часть атомных электрических станций», а также в Национальном техническом университете Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; в Белорусском государственном технологическом университете; в составе курса лекций Государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь» по дисциплине «Промышленная безопасность»;

в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» при чтении курса лекций по дисциплине «Автоматизация систем управления теплоэнергетическими процессами АЭС». Получен патент на изобретение Евразийской патентной организации от 31.08.2017 № 027537 «Регулятор уровня воды в барабане парогенератора», а также при подготовке БНТУ коммерческого предложения в ГПО «Белэнерго».

Опубликование результатов диссертации

По тематике и результатам диссертационной работы опубликовано 28 печатных работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах, 7 статей в других рецензируемых научных журналах, материалы 3 докладов на научно-технических и научно-практических конференциях, тезисы 11 докладов на научно-технических конференциях, 1 патент на изобретение, 1 учебное пособие с грифом Министерства образования Республики Беларусь, 1 учебно-методическое пособие для студентов технических вузов. Результаты работы включены в 1 отчет о НИР.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 5,09 авторского листа (из них без соавторов – 1 статья).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и девяти приложений. Общий объем диссертации составляет 175 страниц, из них 74 страницы основного текста. Работа содержит 69 рисунков на 61 странице, 14 таблиц на 13 страницах, библиографический список из 149 источников на 12 страницах и 28 публикаций автора на 6 страницах, 9 приложений на 9 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** рассмотрена актуальность выбранного направления исследования.

В **общей характеристике работы** сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, представлены основные положения, выносимые на защиту, показан уровень опубликования и апробирования результатов диссертационной работы.

В **первой главе** диссертации приведен анализ литературных источников и результатов эксплуатации типовой трехимпульсной САУ уровнем воды в барабане парового котла и различных ее модификаций. Рассмотрены функции и назначение существующих САУ уровнем воды в барабане паровых котлов, проведен анализ их структуры. Рассмотрены принципы работы и конструкции уровнемеров и регулирующих клапанов. Особое внимание уделено состоянию, проблемам и перспективам создания САУ высокой динамической точности. Проведен анализ показателей надежности САУ уровнем воды в барабане котлов с учетом аварий и отказов их работы. Обоснована целесообразность разработки комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов высокой динамической точности в широком диапазоне изменения нагрузок. Показано, что барабан парового котла является сложным объектом управления со многими контролируемыми и регулируемыми величинами, его относят к объектам управления без самовыравнивания, а качество поддержания уровня воды в барабане во многом определяет безопасность, надежность, долговечность и экономичность работы теплоэнергетического оборудования в переменных режимах. Основным регулируемым параметром барабанного парового котла является уровень воды, к стабилизации которого предъявляют жесткие требования. Далее рассмотрены способы измерения уровня воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС, а также особенности конструкции регулирующих клапанов. Показано, что наибольшее число отказов приходится на долю исполнительных механизмов и регулирующих клапанов САУ уровнем воды барабанных паровых котлов (до 45 %). Отмечено, что использование широкодиапазонных регулирующих клапанов с саморазгрузкой позволяет существенно повысить экономичность, надежность и долговечность работы САУ уровнем воды в барабане паровых котлов. Обоснована необходимость модернизации САУ уровнем воды в барабане паровых котлов на основе современных экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации динамических систем в широком диапазоне изменения нагрузок котла и комбинированных принципов регулирования.

Во **второй главе** обоснован выбор объектов управления уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и АЭС. При этом была использована математическая модель процесса работы САУ уровнем воды в барабане парового котла на полный и частичный сброс нагрузки котла, позволяющая уточнить уставки срабатывания технологических защит по уровню без проведения натурных испытаний. Об удовлетворительном качестве моделирования переходных процессов по уровню воды в барабане котла БКЗ-210-140 с использованием пакета прикладных программ Matlab свидетельствует то, что при натурных испытаниях САУ на сброс нагрузки максимальное отклонение уровня составляло соответственно плюс 120 мм вместо 117,4 мм при

моделировании и минус 70 мм вместо 70,1 мм, т. е. относительная максимальная погрешность по уровню не превышает 2,17 и 0,14 % соответственно. Это позволило подтвердить адекватность расчетных динамических характеристик объекта управления динамике реального котла, а также уточнить уставки срабатывания технологических защит.

Особое внимание уделено моделированию переходных процессов САУ уровнем воды в барабане котла различной структуры и методам оптимизации параметров динамической настройки регуляторов, в том числе и зарубежным. На основе проведенного сравнительного анализа показателей качества переходных процессов типовых САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и ее модификаций установлено, что наилучшие прямые показатели качества обеспечивает типовая каскадная САУ с корректирующим ПИД-регулятором, настроенным по методу полной компенсации в частном виде.

Третья глава диссертации посвящена разработке высококачественных комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов. Приведен анализ существующих методов параметрической оптимизации САУ.

Разработанная и запатентованная комбинированная САУ уровнем воды в барабане парового котла с выделением эквивалентного внешнего возмущения основана на базе предложенных экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации динамических систем с использованием теории инвариантности. При этом структура оптимального регулятора САУ выбрана по передаточной функции опережающего участка объекта управления в соответствии с формулой

$$W_p(p) = \frac{W_{зд}(p)}{W_{оп}(p)} \cdot \frac{1}{1 - W_{зд}(p)}, \quad (1)$$

где $W_{зд}(p)$ – заданная передаточная функция замкнутой системы внутреннего контура по задающему воздействию (критерий качества отработки сигнала задания); $W_{оп}(p)$ – передаточная функция опережающего участка объекта:

$$W_{оп}(p) = \frac{k_{оп}}{T_{оп}p + 1}, \quad (2)$$

где $k_{оп}$ – коэффициент передачи, $T_{оп}$ – постоянная времени опережающего участка объекта управления, с; p – оператор Лапласа.

Передаточная функция системы по задающему воздействию в соответствии с передаточной функцией объекта (2) равна

$$W_{зд}(p) = \frac{1}{T_{зд}p + 1}, \quad (3)$$

где $T_{зд}$ – численное значение постоянной времени критерия качества, учитывающего скорость изменения уровня воды в барабане парового котла, с.

В результате с учетом передаточных функций (1), (2) и (3) получаем передаточную функцию оптимального регулятора с одним параметром динамической настройки $T_{зд}$:

$$W_p^{opt}(p) = \frac{T_{оп}p + 1}{k_{оп}T_{зд}p}. \quad (4)$$

Численное значение постоянной времени критерия качества $T_{зд}$ находят из характеристического уравнения передаточной функции системы по задающему воздействию с учетом передаточной функции инерционного участка объекта управления:

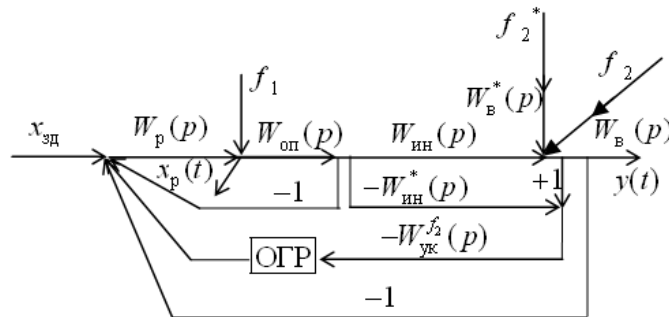
$$W_{ин}(p) = \frac{1}{T_1p(\tau_1p + 1)}, \quad (5)$$

где $W_{ин}(p)$ – передаточная функция инерционного участка объекта управления в виде реального интегрирующего звена; T_1 – постоянная времени, с; τ_1 – время запаздывания по каналу управляющего воздействия, с.

При этом оптимальное значение постоянной времени $T_{зд}$ определяют по формуле

$$T_{зд} = \frac{T_1^2}{27\tau_1}. \quad (6)$$

На рисунке 1 приведена принципиальная схема комбинированной САУ.



$y(t)$ – основная регулируемая величина; $x_{зд}$ – заданное значение основной регулируемой величины; $x_p(t)$ – регулирующее воздействие; f_1 – внутреннее возмущение; f_2 – внешнее топочное возмущение; f_2^* – внешнее возмущение расходом пара; $W_p(p)$ – передаточная функция регулятора; $W_{ук}^{f_2}(p)$ – передаточная функция устройства компенсации; $W_{оп}(p)$ – передаточная функция опережающего участка объекта управления; $W_{ин}(p)$ – передаточная функция инерционного участка объекта управления; $W_{ин}^*(p) = W_{ин}(p)$ – передаточная функция модели инерционного участка объекта управления; $W_б(p)$ – передаточная функция топочного возмущения; $W_б^*(p)$ – передаточная функция внешнего возмущения расходом пара, OГР – ограничитель

Рисунок 1. – Принципиальная схема предложенной комбинированной САУ уровнем воды в барабане парового котла

Для существенного улучшения качества отработки внешних возмущений параллельно реальному инерционному участку объекта формируют динамическую модель этого участка, выход которого алгебраически складывают с основной регулируемой величиной. Полученную разность подают на вход устройства компенсации выделенного эквивалентного внешнего возмущения без его непосредственного измерения, а выход с обратным знаком через ограничитель – на вход регулятора (см. рисунок 1).

При этом передаточную функцию устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения определяют из условия инвариантности основной регулируемой величины по отношению к скачкообразному изменению эквивалентного внешнего возмущения:

$$W_{\text{ук}}^{f2}(p) \cdot W_{\text{зд}}(p) \cdot W_{\text{ин}}(p) = 1. \quad (7)$$

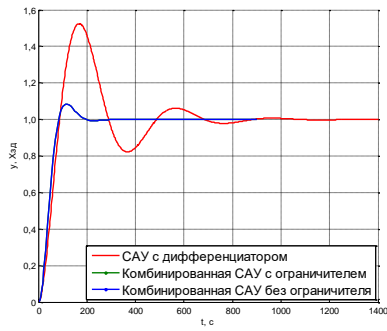
Из (7) с учетом (3) и (5) находят передаточную функцию устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения, которую с целью ее физической реализации умножают на передаточную функцию инерционного звена 3-го порядка с постоянной времени $T_{\text{зд1}}$:

$$W_{\text{ук}}^{f2}(p) = \frac{T_1 p (\tau_1 p + 1) (T_{\text{зд}} p + 1)}{(T_{\text{зд1}} p + 1)^3}. \quad (8)$$

Приняв $T_{\text{зд}} = T_{\text{зд1}}$, получаем

$$W_{\text{ук}}^{f2}(p) = \frac{T_1 p (\tau_1 p + 1)}{(T_{\text{зд}} p + 1)^2} = \frac{T_1 p}{T_{\text{зд}} p + 1} \cdot \frac{\tau_1 p + 1}{T_{\text{зд}} p + 1}. \quad (9)$$

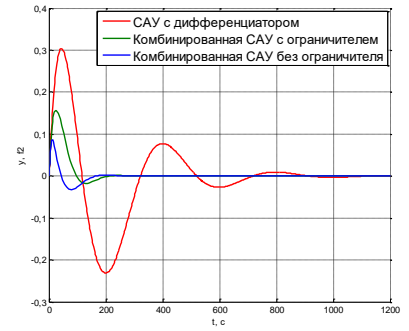
Передаточная функция устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения представляет собой последовательное соединение реального дифференцирующего звена и звена быстрого реагирования, так как численное значение τ_1 больше $T_{\text{зд}}$. Так как разность сигналов основной регулируемой величины и выхода модели инерционного участка объекта поступает на вход звена быстрого реагирования, а затем дифференцирующего звена, то сигнал с его выхода должен быть ограничен по величине с целью уменьшения максимальной величины регулирующего воздействия расходом питательной воды до значения типовой трехимпульсной САУ. Результаты моделирования переходных процессов инвариантной САУ уровнем воды в барабане парового котла с ограничением максимальной величины регулирующего воздействия и без ее ограничения, а также результаты моделирования переходных процессов САУ уровнем воды с дифференциатором приведены на рисунке 2.



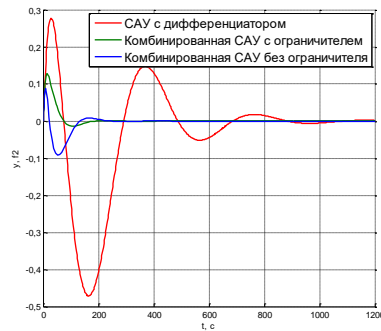
а



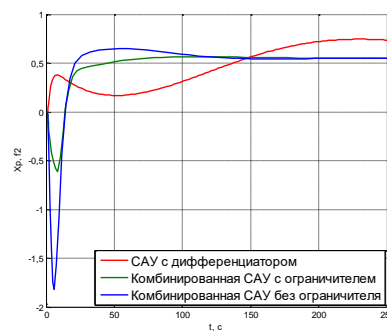
б



в



г



д

а – отработка скачка задающего воздействия $x_{зД}$; **б** – отработка внутреннего возмущения f_1 ; **в** – отработка внешнего возмущения расходом дымовых газов f_2 ; **г** – отработка внешнего возмущения расходом пара f_2^* ; **д** – изменения регулирующего воздействия $x_p(t)$ при отработке внешнего возмущения расходом пара; t – время

Рисунок 2. – Графики переходных процессов комбинированной САУ уровнем воды в барабане парового котла и САУ с дифференциатором

Из графиков переходных процессов следует, что с ограничением максимальной величины регулирующего воздействия при всех возмущающих воздействиях время регулирования у комбинированной САУ сокращается в 5 раз по сравнению с САУ с дифференциатором. Величина перерегулирования при отработке задающего воздействия сокращается в 4,3 раза, а максимальные динамические ошибки регулирования уменьшаются: при отработке внутреннего возмущения – в 16,4 раза; при отработке топочного возмущения – в 2 раза; при отработке возмущения расходом пара – в 2,1 раза. Величина регулирующего воздействия у САУ с дифференциатором находится в пределах от 0 до плюс 0,75, а у комбинированной САУ – от минус 0,6 до плюс 0,75. Ограничение выходного сигнала приводит к уменьшению максимальной величины регулирующего воздействия (см. рисунок 2, д). При этом увеличивается максимальная динамическая ошибка регулирования при отработке возмущения расходом

перегретого пара на 35 %, однако остается в 2,1 раза меньше, чем у САУ с дифференциатором, а время отработки внешних возмущений остается прежним.

Для парогенераторов энергоблоков АЭС с ВВЭР разработаны три комбинированные САУ уровнем воды в барабане парогенератора ПГВ-1000 при плановом изменении нагрузки и полной инвариантностью по отношению к наиболее опасному внутреннему возмущению с измерением внешнего возмущения расходом пара: САУ с использованием компенсатора главной обратной связи при отработке задающего сигнала; САУ со сглаживанием задающего сигнала и использованием ПИ-регулятора, настроенного на симметричный оптимум (СО); САУ на базе оптимальных регуляторов. В этих САУ структура и динамические настройки стабилизирующих регуляторов за счет дополнительного усилителя на выходе корректирующего регулятора обеспечивают равенство корректирующих $x_k(t)$ и регулирующих $x_p(t)$ воздействий, а также полную инвариантность отработки внутренних возмущений и инвариантность с точностью до ε при отработке внешних возмущений расходом пара. Прямые показатели качества переходных процессов двух предложенных САУ в сравнении с типовой трехимпульсной САУ и цифровой САУ с наблюдателем состояния приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Показатели качества переходных процессов сравниваемых САУ

Наименование САУ	Показатели качества			
	$\Delta y / y_n$	ΔH_{σ} , мм вод. ст.	t_p , с	$\overline{X_p^m}$
Типовая трехимпульсная САУ*	0,034	83,6	160	0,454
Цифровая САУ с наблюдателем состояния*	0,031	76,0	130	+0,61
Комбинированная САУ со сглаживанием задающего сигнала и использованием ПИ-регулятора (СО)	0,016	41,0	200	+0,46
Комбинированная САУ на базе оптимальных регуляторов	0,024	61,5	75	+0,475

* – Оптимальный ПИ-регулятор уровня воды в парогенераторе энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 / В. А. Демченко [и др.] // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – Вып. 1. – С.73–76.

Из анализа данных таблицы 1 следует, что предложенные комбинированные САУ обеспечивают лучшие прямые показатели качества как по отношению к типовой трехимпульсной САУ, так и цифровой САУ с наблюдателем состояния. Здесь были приняты следующие обозначения: $\Delta y / y_n$ – относительное отклонение уровня воды в барабане от номинального; ΔH_{σ} – абсолютное отклонение уровня

воды; t_p – время регулирования; $\overline{X_p^M}$ – максимальная величина регулирующего воздействия.

Далее в главе определена зависимость, позволяющая выбрать величину ограничения выходного сигнала с устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения для корректировки максимальной величины регулирующего воздействия по расходу питательной воды в зависимости от расхода пара котла комбинированной САУ уровнем воды в барабане парового котла с ограничением.

В четвертой главе разработана методика оценки показателей качества регулирования комбинированных систем автоматического управления уровнем воды в барабане парового котла на показатели долговечности, экономичности и надежности работы теплоэнергетического оборудования с учетом не только внезапных, но и постепенных отказов. Длительная работа паровых котлов в переменных режимах приводит к появлению трещин на внутренней поверхности его барабана. Характер трещин – усталостно-коррозионный. Трещины расположены по направлению оси барабана. Определено, что скорость изменения уровня воды при переменных нагрузках, а также в режимах пуска и останова котла оказывает наибольшее влияние на температурные напряжения в металле стенки барабана котла. При этом термические напряжения зависят от качества регулирования уровня воды в барабане котла. Так, увеличение времени достижения заданной нагрузки котла ведет к уменьшению величины перерегулирования при отработке задающего воздействия. Это позволяет выбрать такое время достижения заданной нагрузки котла, которое будет соответствовать величине допустимой скорости нагрева стенки металла барабана котла 2–3 град/мин в режиме пуска, либо величине допустимой скорости охлаждения 1–1,5 град/мин в режиме останова.

Отмечено, что для уменьшения величины термических напряжений в металле барабана котла в пусковых режимах к основной схеме САУ уровнем воды в барабане котла необходимо добавлять программное задающее устройство, формирующее допустимую скорость изменения нагрузки котла в зависимости от исходного теплового состояния объекта управления. Оценка показателей надежности комбинированных систем автоматического управления уровнем воды в барабане котла предложено проводить с учетом не только внезапных, но и постепенных отказов, а также ущерба от аварий, пересчитанного в постепенные отказы. Установлено, что внедрение комбинированной САУ уровнем воды в барабане парового котла позволит увеличить эквивалентный коэффициент готовности системы на 5,79 % по сравнению с типовой САУ.

Разработанная методика позволяет оценить экономическую целесообразность модернизации систем автоматического управления уровнем воды барабанных паровых котлов ГПО «Белэнерго».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Аналитические экспресс-методы структурно-параметрической оптимизации САУ для объектов без самовыравнивания, учитывающие динамические характеристики объектов управления без ограничения порядка их моделей, на основе которых определяют структуру модели критериев качества по задающему воздействию, что позволяет сконструировать комбинированные САУ с существенным уменьшением количества параметров их динамической настройки, учесть максимальную величину корректирующего и регулирующего воздействий, сократить время на их наладку [1, 6, 11, 12, 15, 17, 21, 22, 23].

2. Математическая модель оценки качества переходных процессов САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС на частичный и полный сброс нагрузки котла на основе экспериментальных динамических характеристик объекта управления при возмущении расходом питательной воды и внешних возмущений расходом перегретого пара без проведения натурных испытаний систем. Это позволяет определять уставки срабатывания автоматических технологических защит как по повышению, так и по понижению уровня воды в барабане котла или парогенератора, с которыми работают разработанные САУ, а также устранять риски появления аварийных ситуаций при проведении натурных испытаний на полный сброс нагрузки [5, 24].

3. Четыре варианта схем комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС:

3.1. Комбинированная САУ уровнем воды в барабане паровых котлов с ограничением максимальной величины выходного сигнала устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения [19, 25], отличающаяся тем, что:

– параллельно инерционному участку объекта управления формируют его динамическую модель, что позволяет выделить эквивалентное внешнее возмущение без его непосредственного измерения и определения динамических характеристик, необходимых для настройки устройств компенсации [7, 8, 9, 14,];

– выход сигнала основной регулируемой величины по уровню воды в барабане парового котла с инерционного участка модели объекта управления подключают к входу устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения, реализованного в виде последовательного соединения реального дифференциатора и звена быстрого реагирования, что позволяет повысить качество управления при отработке внешнего возмущения без его непосредственного измерения [7, 8, 9, 14];

– на выходе устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения дополнительно установлен ограничитель, что позволяет при сохранении высокого качества управления по сравнению с известными САУ корректировать максимальную величину регулирующего воздействия по расходу питательной воды, тем самым увеличить срок службы барабана котла и его экранных труб [1, 9].

3.2. Комбинированная САУ с использованием компенсатора главной обратной связи при отработке задающего сигнала. Время отработки задающего воздействия этой системы на 30 % меньше, чем у комбинированной САУ с ограничением максимальной величины выходного сигнала устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения [4].

3.3. Комбинированная САУ со сглаживанием задающего сигнала и использованием ПИ-регулятора, настроенного на симметричный оптимум, позволяющая уменьшить максимальную динамическую ошибку регулирования по сравнению с типовой трехимпульсной САУ в 2 раза при 25%-м увеличении полного времени регулирования [2, 4].

3.4. Комбинированная САУ на базе оптимальных регуляторов, позволяющая сократить время отработки возмущения по расходу пара на 73,3 % по сравнению с типовой трехимпульсной САУ, получить полную инвариантность по отношению к наиболее опасному внутреннему возмущению, уменьшить абсолютное отклонение уровня воды на 19,1 % по отношению к цифровому ПИ-регулятору с наблюдателем состояния [3, 4, 19, 20].

4. Методика автоматической корректировки параметров динамической настройки комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов, позволяющая сохранить высокое качество регулирования во всем диапазоне изменения нагрузок, включая пусковые режимы, отличающаяся тем, что:

– параметры динамической настройки регулятора, устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения, ограничителя выходного сигнала последнего и модели инерционного участка объекта управления корректируют в зависимости от расхода пара на выходе котла с помощью дополнительного блока коррекции параметров [26];

– скорость изменения уровня воды в барабане парового котла при пуске формируют в зависимости от его начального теплового состояния с помощью программного задающего устройства [26].

5. Методика оценки влияния изменения качественных характеристик переходных процессов комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов, учитывающая ущерб не только от внезапных, но и постепенных отказов, а также аварий, что может быть использовано для обоснования экономической целесообразности модернизации существующих

САУ уровнем воды барабанных котлов ГПО «Белэнерго». Это позволит повысить эквивалентный коэффициент готовности системы (котел и технические средства реализации комбинированной САУ) на 5,79 %, а также уменьшить общее количество отказов в 2,4 раза [10, 13, 16, 18].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты проведенных исследований позволили сформулировать следующие практические рекомендации для повышения качества управления уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов:

1. Аналитические экспресс-методы структурно-параметрической оптимизации САУ для объектов без самовыравнивания на основе заданных передаточных функций системы, учитывающие структуру и динамику объекта, критерии качества, а также имеющие в каждом контуре системы единственный расчетный параметр динамической настройки, ограничивающие максимально допустимую величину регулирующего воздействия при отработке задания, позволят с использованием теории инвариантности создать комбинированные САУ высокой динамической точности.

2. Комбинированные САУ уровнем воды могут быть использованы ГПО «Белэнерго» при модернизации существующих систем путем их замены на разработанные, что позволит повысить безопасность, надежность, экономичность и долговечность работы теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС.

3. Математическая модель оценки качества переходных процессов САУ уровнем воды на частичный и полный сброс нагрузки котла может быть использована для уточнения уставок срабатывания технологических защит без проведения натурных испытаний систем.

4. Методика автоматической корректировки параметров динамической настройки комбинированных САУ уровнем воды может быть использована для настройки регуляторов типовых каскадных САУ, что позволит повысить качество поддержания уровня воды в барабане паровых котлов и парогенераторов.

5. Методика оценки влияния изменения качественных характеристик переходных процессов комбинированных САУ уровнем воды может быть использована ГПО «Белэнерго» при разработке программ модернизации этих систем с обоснованием технико-экономической эффективности их внедрения в Республике Беларусь.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в изданиях согласно перечню ВАК и в зарубежных изданиях

1. Кулаков, Г. Т. Исследование различных методов оптимизации динамики систем автоматического регулирования питания водой барабанных котлов и парогенераторов ТЭС и АЭС / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Доклады БГУИР. – 2015. – № 2 (88). – С. 229–231.

2. Кулаков, Г. Т. Система автоматического управления уровнем парогенераторов АЭС на базе контура регулирования со сглаживанием задающего сигнала / Г. Т. Кулаков, С. М. Сацук, А. Н. Кухоренко // Доклады БГУИР. – 2018. – № 1 (111). – С. 72–77.

3. Кулаков, Г. Т. Комбинированная система автоматического управления уровнем воды в барабане парогенераторов атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором / Г. Т. Кулаков, С. М. Сацук, А. Н. Кухоренко // Доклады БГУИР. – 2018. – № 2 (112). – С. 106–112.

4. Герасимович, Л. С. Синтез систем управления высокой динамической точности объектов без самовыравнивания / Л. С. Герасимович, Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Вести института современных знаний. – 2018. – № (75)/2018. – С. 131–138.

Статьи в других изданиях

5. Кулаков, Г. Т. Математическое моделирование переходных процессов трехимпульсной системы автоматического регулирования питания водой парогенератора на сброс нагрузки / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 1. – С. 57–64.

6. Кулаков, Г. Т. Оптимизация переходных процессов изменения уровня воды в барабане паровых котлов / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 4. – С. 63–74.

7. Кулаков, Г. Т. Инвариантная система автоматического регулирования с использованием промежуточного сигнала теплоэнергетического параметра / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко И. М. Голинко // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2015. – № 1. – С. 62–72.

8. Кулаков, Г. Т. Инвариантная система автоматического регулирования уровня воды в барабане котла / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2015. – № 2. – С. 35–47.

9. Кулаков, Г. Т. Инвариантная система автоматического регулирования питания барабанного парового котла / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко //

Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2015. – № 5. – С. 59–68.

10. Кухоренко, А. Н. Методика расчета экономической эффективности внедрения инвариантной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла / А. Н. Кухоренко // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2015. – № 6. – С. 62–73.

11. Математическое моделирование как инструмент анализа показателей надежности и экономичности автоматизированного теплоэнергетического оборудования ТЭС / Г. Т. Кулаков, В. В. Кравченко, Н. Б. Карницкий, А. Н. Кухоренко // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 1. – С. 2–7.

Материалы конференций

12. Кулаков, Г. Т. Оптимизация расхода воды в барабане котла / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2015 г. / редкол.: Ф. И. Пантелеенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2015. – С. 105–106.

13. Кухоренко, А. Н. Аварии паровых котлов – как недостаток системы автоматического регулирования уровнем воды в его барабане / А. Н. Кухоренко, Г. Т. Кулаков // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов IX Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов), Минск, 2015 г.: в 2 ч. – Минск: КИИ, 2015. – Ч. 1. – С. 36–37.

14. Кулаков, Г. Т. Инвариантная система автоматического регулирования уровня воды в барабане парового котла без измерения внешних возмущений / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Информационные технологии и системы 2018 (ИТС 2018) = Information Technologies and Systems 2018 (ITS 2018) : материалы междунар. науч. конф., Республика Беларусь, Минск, 25 октября 2018 г. / редкол. : Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск : БГУИР, 2018. – С. 46–47.

Тезисы докладов

15. Кулаков, Г. Т. Структурно-параметрическая оптимизация регуляторов уровня барабанных парогенераторов ТЭС и АЭС / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы междунар. науч.-практ. конф. / редкол.: Б. М. Хрусталева (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2013. – С. 21–22.

16. Кулаков, Г. Т. Повышение промышленной безопасности парогенераторов путем оптимизации системы управления уровнем воды в его

барабане / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2013 г. : в 4 т. – Минск : БНТУ, 2013. – Т. 1. – С. 100–101.

17. Кулаков, Г. Т. Структурно-параметрический метод аналитического конструирования систем автоматического регулирования для объектов без самовыравнивания / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2013 г. : в 4 т. – Минск : БНТУ, 2013. – Т. 1. – С. 101–102.

18. Кухоренко, А. Н. Состояние и перспективы модернизации систем автоматического управления уровнем воды в барабане котла / А. Н. Кухоренко, Г. Т. Кулаков // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов), Минск, 2014 г. : в 2 ч. – Минск: КИИ, 2014. – Ч. 1. – С. 57–58.

19. Кухоренко, А. Н. Модернизация системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла / А. Н. Кухоренко, Г. Т. Кулаков // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: тези доп. XII Міжнар. наук.-практ. конф. аспірантів, магістрантів і студентів, Київ, 22–25 квітня 2014 р. : в 2 т. – Київ, 2014. – Т. 2. – С. 136.

20. Кухоренко, А. Н. Сокращение количества аварий и пожаров, вызванных отказами в работе теплоэнергетического оборудования за счет улучшения качества регулирования технологического процесса / А. Н. Кухоренко // Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве: сб. материалов междунар. заочной науч.-практ. конф., Минск, 2014 г. – Минск: КИИ, 2014. – С. 65–67.

21. Экспресс-методы структурно-параметрической оптимизации систем автоматического регулирования высокой динамической точности / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко, В. А. Ковалев // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 октября 2014 г. : в 2 ч. – Минск, 2014. – Ч. 2. – С. 190–193.

22. Кулаков, Г. Т. Сравнительные исследования методов оптимизации пропорционально-интегральных и пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов для объектов без самовыравнивания / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2014 г. : в 4 т. – Минск: БНТУ, 2014. – Т. 1. – С. 242–243.

23. Кулаков, Г. Т. Методы оптимизации динамики стабилизирующего регулятора каскадной САР с учетом максимальной величины регулирующего воздействия / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Наука – образованию,

производству, экономике: материалы 13-й Международ. науч.-техн. конф., Минск, 2014 г. : в 4 т. – Минск: БНТУ, 2014. – Т. 1. – С. 71.

24. Кулаков, Г. Т. Идентификация участков объектов регулирования уровня воды в барабане котла / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 13-й Международ. науч.-техн. конф., Минск, 2014 г. : в 4 т. – Минск: БНТУ, 2014. – Т. 1. – С. 87–88.

25. Кулаков, Г. Т. Усовершенствование комбинированной САУ уровня воды в барабане парового котла / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 15-й Международ. науч.-техн. конф., Минск, 2017 г. : в 4 т. – Минск: БНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 125.

Патенты на изобретения

26. Регулятор уровня воды в барабане парогенератора: пат. 027537 Евразийское патентное ведомство, F22D 5/30 (2006 01) / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко; заявитель Белорусский национальный технический университет; заявл. 22.04.2015; опубл. 31.08.2017.

Учебные пособия

27. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. пособие / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, В. В. Кравченко, А. Н. Кухоренко, Ю. М. Ковриго, И. М. Голинко, Т. Г. Баган, А. С. Бунке; под общ. ред. Г. Т. Кулакова. – Минск: Выш. шк., 2017. – 238 с.

28. Теория автоматического управления : учеб.-метод. пособие / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко, В. В. Кравченко; под общ. ред. Г. Т. Кулакова. – Минск: БНТУ, 2017. – 133 с.

РЭЗІЮМЭ

Кухарэнка Аляксандр Мікалаевіч

Высакаякасныя камбінаваныя сістэмы аўтаматычнага кіравання ўзроўнем вады ў барабане паравых катлоў і парагенератараў

Ключавыя словы: узровень вады ў барабане катла, камбінаваная сістэма аўтаматычнага кіравання, высокая дынамічная дакладнасць, прамысловая бяспека, надзейнасць, эканамічнасць, даўгавечнасць.

Мэта працы: распрацоўка высакаякасных камбінаваных САК узроўнем вады ў барабане паравых катлоў ЦЭС і парагенератараў АЭС, якія дазваляюць істотна палепшыць якасць рэгулявання і павысіць эфектыўнасць працы ЦЭС і АЭС у шырокім дыяпазоне змены нагрузак.

Метады даследавання і выкарыстование абсталявання: экспрэс-метады структурна-параметрычнай аптымізацыі, тэорыя інварыянтнасці. Асяроддзе праграмавання – пашырэнне Simulink праграмнага пакета Matlab 7.8.0.347.

Атрыманыя вынікі і іх навізна:

– аналітычныя экспрэс-метады структурна-параметрычнай аптымізацыі САК для аб'ектаў без самавыраўноўвання, якія ўлічваюць структуру і дынаміку аб'ектаў і крытэрыі якасці кіравання, якія дазваляюць ствараць камбінаваныя сістэмы кіравання;

– матэматычная мадэль ацэнкі якасці пераходных працэсаў САК узроўнем вады ў барабане паравых катлоў ЦЭС і парагенератараў АЭС на частковы і поўны скід нагрузкі катла на аснове эксперыментальных дынамічных характарыстык аб'екта кіравання без правядзення натуральных выпрабаванняў сістэм;

– чатыры варыянты схем высакаякасных камбінаваных САК узроўнем вады ў барабане паравых катлоў ЦЭС і парагенератараў АЭС, якія ўлічваюць максімальную велічыню рэгулюючага ўздзеяння, а таксама метадыка іх параметрычнай аптымізацыі;

– метадыка аўтаматычнай карэкціроўкі параметраў дынамічнай наладкі высакаякасных камбінаваных САК узроўнем вады ў барабане паравых катлоў і парагенератараў у залежнасці ад нагрузкі, хуткасці змены ўзроўню вады ў барабане пры пуску і пачатковага цеплавога стану;

– метадыка ацэнкі ўплыву змены якасных характарыстык пераходных працэсаў камбінаваных САК узроўнем вады ў барабане паравых катлоў і парагенератараў на паказчыкі бяспекі, надзейнасці, даўгавечнасці і эканамічнасці працы цеплаэнергетычнага абсталявання ЦЭС і АЭС.

Рэкамендацыі па выкарыстанню і вобласць прымянення: ДПА «Белэнерга», аб'екты цеплаэнергетыкі.

РЕЗЮМЕ

Кухоренко Александр Николаевич

Высококачественные комбинированные системы автоматического управления уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов

Ключевые слова: уровень воды в барабане котла, комбинированная система автоматического управления, высокая динамическая точность, промышленная безопасность, надежность, экономичность, долговечность.

Цель работы: разработка высококачественных комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС, позволяющих существенно улучшить качество регулирования и повысить эффективность работы ТЭС и АЭС в широком диапазоне изменения нагрузок.

Методы исследования и использованная аппаратура: экспресс-методы структурно-параметрической оптимизации, теория инвариантности. Среда программирования – расширение Simulink программного пакета Matlab 7.8.0.347.

Полученные результаты и их новизна:

– аналитические экспресс-методы структурно-параметрической оптимизации САУ для объектов без самовыравнивания, учитывающие структуру и динамику объектов и критерии качества управления, позволяющие создавать комбинированные системы управления;

– математическая модель оценки качества переходных процессов САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС на частичный и полный сброс нагрузки котла на основе экспериментальных динамических характеристик объекта управления без проведения натурных испытаний систем;

– четыре варианта схем комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС, учитывающие максимальную величину регулирующего воздействия, а также методика их параметрической оптимизации;

– методика автоматической корректировки параметров динамической настройки комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов в зависимости от нагрузки, скорости изменения уровня воды в барабане при пуске и начального теплового состояния;

– методика оценки влияния изменения качественных характеристик переходных процессов комбинированных САУ уровнем воды в барабане паровых котлов и парогенераторов на показатели безопасности, надежности, долговечности и экономичности работы теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС.

Рекомендации по использованию и область применения: ГПО «Белэнерго», объекты теплоэнергетики.

SUMMARY

Alexander N. Kukhorenko

High quality combined automatic water level control systems in the drum of steam boilers and steam generators

Key words: water level in the boiler drum, combined with automatic control system, high dynamic accuracy, industrial safety, reliability, efficiency, durability.

The aim of research: development of combined automatic water level control system in the drum of steam boilers of Thermal Power Plants and steam generators of Nuclear Power Plants which allowing to improve the quality of regulation and increase the efficiency of their work in a wide range of load changes.

Research methods and equipment used: express methods of structural-parametric optimization, invariance theory. Programming environment—extension of the Simulink software package of Matlab 7.8.0.347.

Findings and their novelty:

- analytical express-methods of structural-parametric optimization of ACS for objects without self-leveling, taking into account the structure and dynamics of objects and management quality criteria, allowing to create a combined control system;
- mathematical model for assessing the quality of transient processes of ACS water level in the drum of steam boilers of Thermal Power Plants and steam generators of Nuclear Power Plants for partial and full load shedding of the boiler based on the experimental dynamic characteristics of the control object without conducting full-scale tests of systems was developed;
- four variants of schemes of high-quality combined ACS water level in the drum of steam boilers of Thermal Power Plants and steam generators of Nuclear Power Plants, taking into account the maximum value of the regulatory impact were developed, as well as the method of their parametric optimization;
- method of automatic adjustment of the combined ACS dynamic control parameters water level in the drum of steam boilers and steam generators depending on load water level speed changes in the drum at start-up and the initial thermal state;
- method of assessment the impact of changes in the qualitative characteristics of transients combined ACS by water level in the drum of steam boilers and steam generators on the safety, reliability, durability and efficiency of thermal power equipment of Thermal Power Plant and Nuclear Power Plants was developed.

Recommendations for use and scope: SPA «Belenergo», objects of heat power engineering.



Научное издание

Кухоренко Александр Николаевич

**ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ
В БАРАБАНЕ ПАРОВЫХ КОТЛОВ И ПАРОГЕНЕРАТОРОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

Подписано в печать	06.02.2019.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс»		Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. Л. 1,5.		Тираж 60 экз.	Заказ 27.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6