

На правах рукописи

Шнайдер Дмитрий Александрович

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
УПРЕЖДАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПО КРИТЕРИЯМ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

**/в теплоэнергетических комплексах металлургических
предприятий/**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск – 2011

Работа выполнена на кафедре «Автоматика и управление» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ).

- Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Казаринов Лев Сергеевич.
- Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ
Лисиенко Владимир Георгиевич;
- доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ
Рапопорт Эдгар Яковлевич;
- доктор технических наук, профессор
Глухов Владимир Николаевич.

Ведущая организация –
ЗАО «Магнитогорскгазстрой», 455000, г. Магнитогорск, ул. Электросети, 19.

Защита диссертации состоится 31.10.2011 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001 главного учебного корпуса.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.298.03; факс: (351) 267-93-69.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.298.03



Некрасов С.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Приоритетным направлением государственной политики развития энергетической инфраструктуры Российской Федерации является проведение работ по энергосбережению и обеспечению энергетической безопасности во всех сферах хозяйственной деятельности, в т.ч. в теплоэнергетических комплексах металлургических предприятий.

Энергетические комплексы металлургических предприятий представляют собой сложные производственные системы, включающие подсистемы выработки, распределения, аккумулирования и потребления энергетических ресурсов (ЭР), в том числе вторичных энергоресурсов (ВЭР) металлургического производства (доменный газ, отработанный пар и пр.). Режимы работы данных подсистем определяются режимами работы технологического оборудования основного металлургического производства и характеризуются существенными колебаниями в выработке и потреблении ЭР. Вместе с тем, объемы потребления ЭР и утилизации ВЭР напрямую определяют энергоемкость металлургического производства, а технические параметры ЭР – качество выпускаемой продукции. Отсюда важной практической задачей является организация эффективного управления энергетическими комплексами металлургических предприятий, учитывающего динамику процессов выработки, распределения, аккумулирования и потребления ЭР, а также влияние отклонений параметров ЭР на качество производимой продукции.

В течение последнего десятилетия отечественными и зарубежными авторами опубликовано значительное количество работ, рассматривающих вопросы применения различных методов повышения эффективности энергопотребления на промышленных предприятиях. Существенный вклад в развитие работ по данному направлению внесли: Баскаков А.П., Башмаков Н.А., Данилов Н.И., Закиров Д.Г., Заславец Б.И., Казаринов Л.С., Кудрин Б.И., Ладыгичев М.Г., Лисиенко В.Г., Никифоров Г.В., Олейников В.К., Плетнев Г.П., Праховник А.В., Сазанов Б.В., Ситас В.И., Султангузин И.А., Фокин В.М., Хайд Д., Чоджой М.Х., Щелоков Я.М. и др.

В области надежности, живучести и безопасности энергетического оборудования существенный вклад внесли Барков А.В., Беляев С.А., Берлявский Г.П., Болотин В.В., Данюшевский И.А., Дьяков А.Ф., Злепко В.Ф., Израилев Ю.Л., Канцдалов В.Г., Пампура В.И., Резинских В.Ф., Ушаков И.А., Карандаев А.С., Хромченко Ф.А., Цапко Г.П. и др.

С точки зрения управления рассматриваемые энергетические комплексы относятся к классу больших систем, являющихся нелинейными, многомерными и многосвязными, со сложным характером переходных процессов, вызванных технологическими режимами выработки и потребления ЭР. Поэтому задачи автоматизированного управления в подобных системах являются весьма сложными.

Оптимизация управления по критериям энергетической эффективности технологического процесса является важнейшей практической задачей при

проектировании и эксплуатации АСУ ТП. Данная задача возникла достаточно рано и реализовывалась в системах автоматической оптимизации (экстремального управления). В период 1950–1980 г.г. появилось большое количество работ, посвященных исследованию и построению различных типов данных систем при регулярных и случайных возмущениях. Среди них следует отметить работы Арефьева Б.А., Дрейпера Ч., Ивахненко А.Г., Казакевича В.В., Красовского А.А., Кунцевича В.М., Ли И., Либерзона Л.М., Медведева Г.А., Моросанова И.С., Пере Р., Растригина Л.А., Родова А.Б., Ротача В.Я., Рукселя Р., Тарасенко В.П., Хамзы М., Элена Ж. и др. Систематическое изложение вопросов, связанных с системами экстремального управления, содержится в монографиях Казакевича В.В., Растригина Л.А. В общей постановке исследованиям систем автоматической оптимизации посвящена обширная литература. Среди фундаментальных отечественных работ в данной области следует указать работы Фельдбаума А.А., Цыпкина Я.З. и Пропоа А.И. Поиску и реализации эффективных решений для управления сложными производственными комплексами посвящены труды Будковского А.Г., Глухова В.Н., Казаринова Л.С., Колесникова А.А., Крутько П.Д., Матвейкина В.Г., Мирошника И.В., Муромцева Д.Ю., Рапопорта Э.Я., Фрадкова А.Л., Шестакова А.Л. и др.

Современные системы управления строятся как автоматизированные комплексы на базе высокопроизводительной вычислительной техники, позволяющей реализовывать сложные алгоритмы управления с использованием разнообразных численных методов и информационных технологий. При этом для современных алгоритмов управления требования оптимальности ведения технологических процессов по технико-экономическим показателям и показателям надежности являются обязательными.

Необходимость учета указанных выше факторов привела к развитию в промышленности методологии *упреждающего управления*, основанной на решении задач текущей оптимизации процессов в реальном времени *on-line* с объектом управления при заданных технических условиях. Алгоритмы упреждающего управления основываются на расчете управляющих воздействий на технологический процесс с целью оптимизации его будущего поведения, начиная с текущего момента времени до определенного горизонта прогноза. При этом в качестве целевых функций могут использоваться самые разнообразные функции в соответствии с техническими и технико-экономическими критериями.

Основные идеи упреждающего управления были сформулированы в работах Пропоа А.И. (1963), Ли И., Маркуса Л. (1967), Цыпкина Я.З. (1968), Ришале Дж. и др. (1976). Дальнейшее развитие методы упреждающего управления технологическими процессами получили в работах авторов: Де Кейзер, Гарсия, Претт, Морари, Риккер, Ли, Сетербег, Маск, Роллингс, Мэйн, Кули, Оллгауэр, Бэджуэлл, Кин, Райт, Женг, Куваритакис, Кэнон, Мацейковский и др. Современные методы адаптивного и модельного прогнозирующего управления технологическими процессами рассмотрены в работах авторов: Гордон Л., Бобцов А.А., Змеу К.В., Еремин Е.Л., Краснощеченко В.И., Лебедев В.Ф., Ноткин Б.С., Прокопчук Е.Л., Решетникова Г.Н., Финаев В.И., Bourdais R., Buisson

J., Chen T., Cooper D., Dumur D., Dougherty D., Hiskens I.A., Li D., Marquez H.J., Moroşan P-D., Odloak D., De Souza G., Venkat A.N., Wright S.J., Zanin A.C. и др. Однако, для рассматриваемого класса крупномасштабных распределенных нелинейных динамических систем, к которым относятся энергетические комплексы металлургических предприятий, построение точных прогнозирующих моделей является крайне сложной и объемной задачей. Реально во многих случаях подобные модели обладают недостаточной точностью оценки показателей эффективности, требуемой в соответствии с технологическими регламентами. Поэтому применение известных методов управления, основанных на построении точных прогнозирующих моделей ТОУ, для эффективного управления энергетическими комплексами металлургического производства имеет определенные ограничения.

В этой связи актуальной проблемой является разработка подхода к управлению, который основывается на упреждающих оценках эффективности процессов, получаемых не на прогнозирующих моделях, заданных на основе ранее проведенных исследований, а исходя из непосредственных измерений двух сторон оценочного отношения: текущих расходов энергетических ресурсов, объемов выходной продукции, а также статистики отказов и аварийных ситуаций. Построение подобных оценок в реальном времени приводит к нетривиальным задачам, так как их решение должно существенно базироваться на комбинированных моделях прямой и обратной динамики управляемых процессов. При этом сам принцип управления, основанный на упреждающих оценках эффективности использования ресурсов до того, как эти ресурсы будут реально использованы или исчерпаны, является естественным условием достижения функциональной и эксплуатационной эффективности в сложных технологических комплексах.

Актуальность данной проблемы поддержана научно-исследовательскими и внедренческими работами на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»), а также грантами Федерального агентства по образованию (контракт № П229 от 23 июля 2009 г.) и Федерального агентства по науке и инновациям (контракт №02.442.11.7322 от 28 февраля 2006 г.).

Целью исследований является разработка методологии упреждающего управления по критериям энергетической эффективности технологических процессов и прогнозирования технического состояния контролируемого оборудования, а также создание на базе разработанной методологии автоматизированных систем управления на основе упреждающих оценок показателей энергетической эффективности теплоэнергетических процессов и систем оперативного планирования ремонтно-профилактических работ по текущему состоянию, определяемому на основе прогнозирования остаточного ресурса оборудования.

Для достижения указанной цели в работе ставятся следующие задачи:

1. Проведение анализа решаемой проблемы и обоснование предлагаемого подхода к управлению технологическими процессами с использованием упреждающих оценок показателей энергетической эффективности, основанного на комбинированных моделях прямой и обратной динамики ТОУ.

2. Разработка теоретических основ построения автоматизированных систем управления теплоэнергетическими процессами металлургического производства с использованием упреждающих оценок показателей энергетической эффективности на базе методов экспоненциальной фильтрации.

3. Разработка экстремальной системы регулирования экономичности процессов горения в энергетических котлах электрических станций, утилизирующих ВЭР металлургического производства, на основе упреждающих оценок показателей энергетической эффективности топочных процессов в реальном времени.

4. Разработка программы оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов по показателям энергетической эффективности при неполных исходных данных по расходам тепла и пара, отбираемого от каждой турбины в отдельности в процессе эксплуатации.

5. Разработка программы мониторинга резервов энергетической эффективности теплоэнергетических процессов электрических станций, основанной на обработке данных эксплуатации блока энергетических котлов и паровых турбин.

6. Разработка автоматизированной системы упреждающего оперативного управления пароснабжением в сложных производственных сетях при больших колебаниях технологических нагрузок по критерию максимума энергетической эффективности.

7. Разработка автоматизированной информационной системы мониторинга остаточного ресурса и оптимального планирования ремонтно-профилактических работ теплоэнергетического оборудования с использованием агрегированных показателей.

8. Разработка систем автоматического регулирования тепловых нагрузок потребителей и программного обеспечения мониторинга экономичности водяных систем теплоснабжения на основе макро моделирования.

9. Применение разработанных методов при построении автоматизированных систем диспетчерского управления теплоснабжением зданий и энергоэффективным наружным освещением на основе интеллектуальных регуляторов.

10. Внедрение и промышленная апробация разработанных автоматизированных систем.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1. Разработан новый подход к автоматизированному управлению технологическими процессами на основе упреждающих оценок показателей энергетической эффективности, отличающийся использованием комбинированных моделей прямой и обратной динамики технологических объектов управления, построенных с применением методов оптимальной фильтрации.

Предложены и апробированы на практике:

– алгоритмы упреждающей оценки показателей энергетической эффективности на основе метода экспоненциальной фильтрации;

– алгоритмы построения обратных динамических операторов с заданными передаточными свойствами в условиях помех на основе спектрального подхода;

– автоматизированные системы управления, использующие упреждающие оценки показателей энергетической эффективности.

2. На основе предложенного подхода разработан новый способ и синтезирована новая структура экстремальной системы регулирования экономичности горения в энергетических котлах электрических станций на основе упреждающих оценок показателей энергоэффективности топочных процессов.

3. Разработана оригинальная методика и программное обеспечение моделирования и оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов в реальном времени, отличительной особенностью которой является новый метод идентификации эффективных энергетических характеристик турбоагрегатов электрических станций на основе использования как текущих данных эксплуатации, так и данных предыдущих тепловых испытаний турбоагрегатов.

4. Предложена концепция энергетической безопасности ТОО, основанная на упреждающих оценках текущего обобщенного остаточного ресурса технологического оборудования по данным эксплуатации. В рамках данной концепции разработаны:

– алгоритм оперативного распознавания предаварийных/аварийных ситуаций на контролируемом технологическом оборудовании и приоритетного планирования ремонтно-профилактических работ по критерию минимума энергетических потерь;

– оригинальное программное обеспечение автоматизированной информационной системы мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса технологического оборудования в реальном времени.

5. Предложена автоматизированная система упреждающего управления пароснабжением металлургического предприятия с учетом текущих оценок показателей эффективности на основе методов обратной динамики и экспоненциальной фильтрации. Разработана и реализована оригинальная математическая модель сложной паровой сети с учетом динамики аккумуляирования пара в двухфазной среде.

6. Предложены новые способы автоматического регулирования расхода тепла в системе центрального отопления зданий в условиях большого диапазона изменения параметров теплоносителя и регулирования горячего водоснабжения зданий. Разработана оригинальная упрощенная математическая модель теплового режима здания. Предложена методика идентификации параметров математической модели теплового режима здания по фактическим данным, доступным непосредственному измерению, на основе метода экспоненциальной фильтрации.

7. Разработана оригинальная автоматизированная система мониторинга и оперативного управления энергетической эффективностью потребителей систем теплоснабжения на основе макро моделирования.

Научная значимость работы. Разработан новый подход к автоматизированному управлению технологическими процессами на основе упреждающих оценок показателей энергетической эффективности, а также к прогнозированию технического состояния контролируемого технологического оборудования, позволяющий повысить энергетическую эффективность и безопасность

ТОУ, работающих в динамических режимах при больших колебаниях параметров ЭР и технологических нагрузок.

Практическая ценность работы. Предложенный подход реализован в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия (ОАО «ММК») и может быть использован в качестве основы для управления технологическими процессами по критериям энергетической эффективности и прогнозирования технического состояния оборудования различного назначения.

Практическая полезность и научная новизна полученных результатов подтверждены 3 патентами РФ на изобретения, 2 свидетельствами на программы для ЭВМ, актами внедрения и испытаний.

Суммарный годовой экономический эффект от внедрения разработанных автоматизированных систем на ОАО «ММК» составляет более 45 млн. рублей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методология автоматизированного управления технологическими процессами на основе упреждающих оценок показателей энергетической эффективности технологического оборудования с использованием комбинированных моделей прямой и обратной динамики ТОУ, построенных с применением методов оптимальной фильтрации.

2. Предложенные и апробированные на практике:

– алгоритмы упреждающей оценки показателей энергетической эффективности на основе метода экспоненциальной фильтрации;

– алгоритмы построения обратных динамических операторов с заданными передаточными свойствами в условиях помех на основе спектрального подхода;

– автоматизированные системы управления, использующие упреждающие оценки показателей энергетической эффективности.

3. Способ экстремального регулирования экономичности горения в энергетических котлах электрических станций на основе упреждающих оценок показателей энергетической эффективности топочных процессов в реальном времени.

4. Методика оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов электрических станций на основе использования метода идентификации эффективных энергетических характеристик по данным текущей эксплуатации и предыдущих тепловых испытаний турбоагрегатов.

5. Метод упреждающей оценки текущего обобщенного остаточного ресурса теплоэнергетического оборудования по данным эксплуатации на основе использования концепции обобщенного ресурса.

6. Математическая модель и структура автоматизированной системы оперативного упреждающего управления сложной паровой сетью с учетом динамики аккумуляции пара в двухфазной среде.

7. Способы автоматического регулирования расхода тепла в системе центрального отопления здания в условиях большого диапазона изменения параметров теплоносителя и регулирования горячего водоснабжения здания.

8. Структура автоматизированной системы мониторинга и оперативного управления энергетической эффективностью потребителей систем теплоснабжения на основе макро моделирования.

9. Результаты реализации предложенных методов и автоматизированных систем упреждающего управления по критериям энергетической эффективности в теплоэнергетическом комплексе ОАО «ММК».

Методы исследования. При решении поставленных задач применялся аппарат теории обыкновенных дифференциальных уравнений, дифференциальных уравнений в частных производных, методы теории автоматического управления, автоматического регулирования, автоматизированных информационных систем, выбросов случайных процессов, математической статистики, прогнозирующего управления, математического моделирования, теории систем теплоснабжения.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе научных результатов, выводов и рекомендаций обеспечивается корректным использованием применяемого математического аппарата, теории автоматического управления и методов математического моделирования исследуемых объектов и систем управления. Справедливость выводов относительно адекватности используемых математических моделей, достоверности, работоспособности и эффективности предложенных алгоритмов управления подтверждена результатами компьютерного моделирования, а также результатами натурных испытаний на реальных объектах теплоэнергетического комплекса промплощадки ОАО «ММК».

Реализация результатов работы. Полученные в работе теоретические положения применены для решения практических задач, связанных с управлением эффективностью теплоэнергетических процессов и прогнозированием технического состояния оборудования металлургического производства и других отраслей промышленности. В частности, разработанные способы, методы и алгоритмы использованы при построении следующих систем:

– система автоматического регулирования подачи воздуха в паровой котел ст. №5 ЦЭС ОАО «ММК» по критерию максимума КПД топочных процессов;

– программа оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов ТЭЦ ОАО «ММК»;

– программа мониторинга резервов энергетической эффективности теплоэнергетических процессов ТЭЦ ОАО «ММК», основанная на обработке данных эксплуатации блока энергетических котлов и паровых турбин;

– программное обеспечение управления экономичностью водяных тепловых сетей ОАО «ММК» на основе макро моделирования;

– автоматизированная информационная система мониторинга остаточного ресурса и планирования ремонтно-профилактических работ по текущему состоянию энергооборудования ЦЭС ОАО «ММК» (АИС «Ресурс»);

– системы автоматического регулирования отопления и горячего водоснабжения зданий промышленной площадки ОАО «ММК».

Кроме того, разработанные автоматизированные системы управления были успешно внедрены в ЖКХ г. Челябинска и Челябинской области.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 18 научно-технических и научно-практических конференциях, в том числе 6 Международных и 7 Всероссийских конференциях: II Международная научно-техническая конференция «Энергосбережение на промышленных предприятиях» (Магнитогорск, 2000); 3-я Всероссийская научная конференция (Санкт-Петербург, 2005); XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий (Екатеринбург, 2006); Всероссийская научно-практическая Интернет-конференция «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (Пермь, 2006); VI Международная научно-практическая конференция (Новочеркасск, 2006); XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий (Миасс, 2007); Международная научно-техническая конференция (Магнитогорск, 2007); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2008); 2-ая международная научно-практическая конференция «Интеграция науки и производства» (г. Тамбов 2009); 3-я международная научно-практическая конференция «Интеграция науки и производства» (г. Тамбов 2009); конференция «Автоматизация инженерных систем в ЖКХ и промышленности» в рамках X всероссийского совещания по энергосбережению (г. Екатеринбург, 2010); X Международная научно-практическая конференция (Новочеркасск, 2010); 5-я конференция «Автоматизация инженерных систем в ЖКХ и промышленности» в рамках 11-го всероссийского совещания по энергосбережению (г. Екатеринбург, 2011).

Кроме того, результаты диссертационной работы были представлены на 7 выставках: Межрегиональный специализированный форум-выставка «ЖКХ – проблемы и решения» (г. Челябинск, 2009); Третья региональная выставка-форум «Малый и средний бизнес Магнитки. Инновационные технологии» (г. Магнитогорск, 2009); XV межрегиональная специализированная выставка «ЖКХ новые стандарты. Энергосбережение. Отопление и Вентиляция» (г. Челябинск, 2010); «Весенняя строительная ярмарка Энерго- и ресурсосбережение 2010» (г. Челябинск, 2010); «Энергетика. Энергоэффективность – 2010» (г. Челябинск, 2010); Международный форум «Изменение климата и экология промышленного города» (г. Челябинск, 2010); Четырнадцатой межрегиональной выставке «Весенняя строительная ярмарка. Энергосбережение. Коммунальное хозяйство» (г. Челябинск, 2011).

Публикации. По материалам диссертации опубликована 65 работ, в том числе 30 статей в изданиях по списку ВАК, 3 патента РФ на изобретения, а также в соавторстве изданы учебное пособие «Автоматизированные информационно-управляющие системы» в 2-х частях (294 с.), монография «Автоматизированные системы управления в энергосбережении» (228 с.), монография «Автоматизированные системы управления энергоэффективным освещением» (208 с.)

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 224 наименования, 8 приложений. Диссертация изложена на 283 страницах и включает 107 рисунков, 22 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая ценность результатов работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, дана краткая характеристика ее разделов.

В первой главе проведен анализ опыта применения автоматизированных систем управления энергетической эффективностью на металлургических предприятиях.

По результатам анализа делается вывод, что несмотря на наличие многочисленных работ по использованию автоматизированных систем управления для решения задач энергосбережения в теплоэнергетических комплексах металлургического производства системного эффекта энергосбережения на предприятиях Российской Федерации еще не получено. Одной из проблем, подлежащих решению, здесь является комплексный подход к решению задач энергосбережения, который должен системно увязывать различные планы рассматриваемой проблемы, в т.ч.:

- технико-экономический уровень управления;
- уровень оперативно-диспетчерского управления;
- локальные системы учета и регулирования потребления ЭР;
- пространственную распределенность сложных теплоэнергетических комплексов, включающих в себя тепловые электростанции, тепловые паровые и водяные сети, котлы-утилизаторы, аккумуляторы технологического пара, потребителей теплоэнергетических ресурсов.

Кроме указанных практических проблем существуют также проблемы теоретического плана.

В реальных производственных условиях в задачах технико-экономического анализа требования к точности оценок объемов производимой продукции, потребленных ресурсов и энергетической эффективности достаточно велики, поэтому для сложных технологических процессов, как правило, используются не прогнозные оценки, а реальные оценки, основанные на непосредственно измеряемых объемах производимой продукции и расходов энергетических ресурсов. При этом чтобы исключить влияние динамики процессов на технико-экономические показатели, они статистически усредняются за достаточно длительный промежуток времени.

Для задач оперативного управления эффективностью технологических процессов подобный подход не всегда является оправданным и здесь необходимо использовать текущие оперативные оценки энергетической эффективности. В этом случае статистический подход, используемый в технико-экономических расчетах, становится уже недостаточным, так как не учитывает динамику технологических процессов. В этой связи является актуальной задача построения управления технологическими процессами на основе текущих оперативных оценок эффективности процессов, вычисляемых в реальном времени по результатам непосредственного измерения как объемов произведенной продукции, так и расходов энергетических ресурсов с учетом динамики

составляющих процессов. В такой постановке задачи уже можно осуществлять текущий оперативный прогноз эффективности сложных технологических процессов, который позволит формировать упреждающее управление потреблением ресурсов еще до того, как эти ресурсы будут использованы.

Приведенные выше задачи в известной литературе в настоящее время исследованы недостаточно, что определяет актуальность цели и задач, решаемых в диссертационном исследовании.

Вторая глава посвящена разработке методологии упреждающего управления по критериям энергетической эффективности в теплоэнергетических комплексах металлургического производства. В качестве примера на рис. 1 приведена схема оперативного управления энергетическим комплексом ОАО «ММК». Теплоэнергетический комплекс ОАО «ММК» включает в себя три основных электрических станции (ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС), тепловые паровые и водяные сети общей протяженностью около 270 км и более 3 тысяч промышленных потребителей теплоэнергетических ресурсов. Электрические станции содержат энергетические котлы и паровые турбины, вырабатывающие электрическую энергию и тепловую энергию в теплофикационной воде и в паре на технологию. Тепловые паровые и водяные сети имеют собственные диспетчерские пункты, которые управляют режимами указанных объектов.

Актуальной задачей в рассматриваемом теплоэнергетическом комплексе является оперативное ведение режимов таким образом, чтобы достичь максимальной энергетической эффективности теплоэнергетического комплекса в целом. Этой цели служит программно-технический комплекс (ПТК), предлагаемый в данной диссертационной работе. Структура ПТК представлена на рис. 2. На верхнем уровне технико-экономического управления используется автоматизированная система мониторинга резервов энергетической эффективности теплоэнергетических процессов электрических станций (на рис. 1 – ПТО ТЭЦ, ПТО ЦЭС, ПТО ПВЭС) и автоматизированная система прогнозирования обобщенного остаточного ресурса теплоэнергетического оборудования.

На уровне электрических станций для энергетических котлов используются экстремальные системы регулирования горения в топках котлов, которые оптимизируют режимы работы котлов по критерию максимума энергетической эффективности. Для паровых турбин используется программа оптимизации режимов турбин по критерию минимума потребления острого пара. Для обеспечения эксплуатационной эффективности работы теплоэнергетического оборудования используется программа мониторинга остаточного ресурса.

При построении указанных автоматизированных систем одной из центральных задач была организация упреждающего управления по критериям энергетической эффективности. Задачи оперативного управления сложными технологическими процессами (ТП) по технико-экономическим показателям в настоящее время, как правило, решаются на основе текущих или прогнозных оценок показателей, которые вычисляются на моделях управляемых процессов. Однако во многих случаях задачи оперативного оценивания технико-экономических показателей оказываются некорректно поставленными и статистически смещенными.

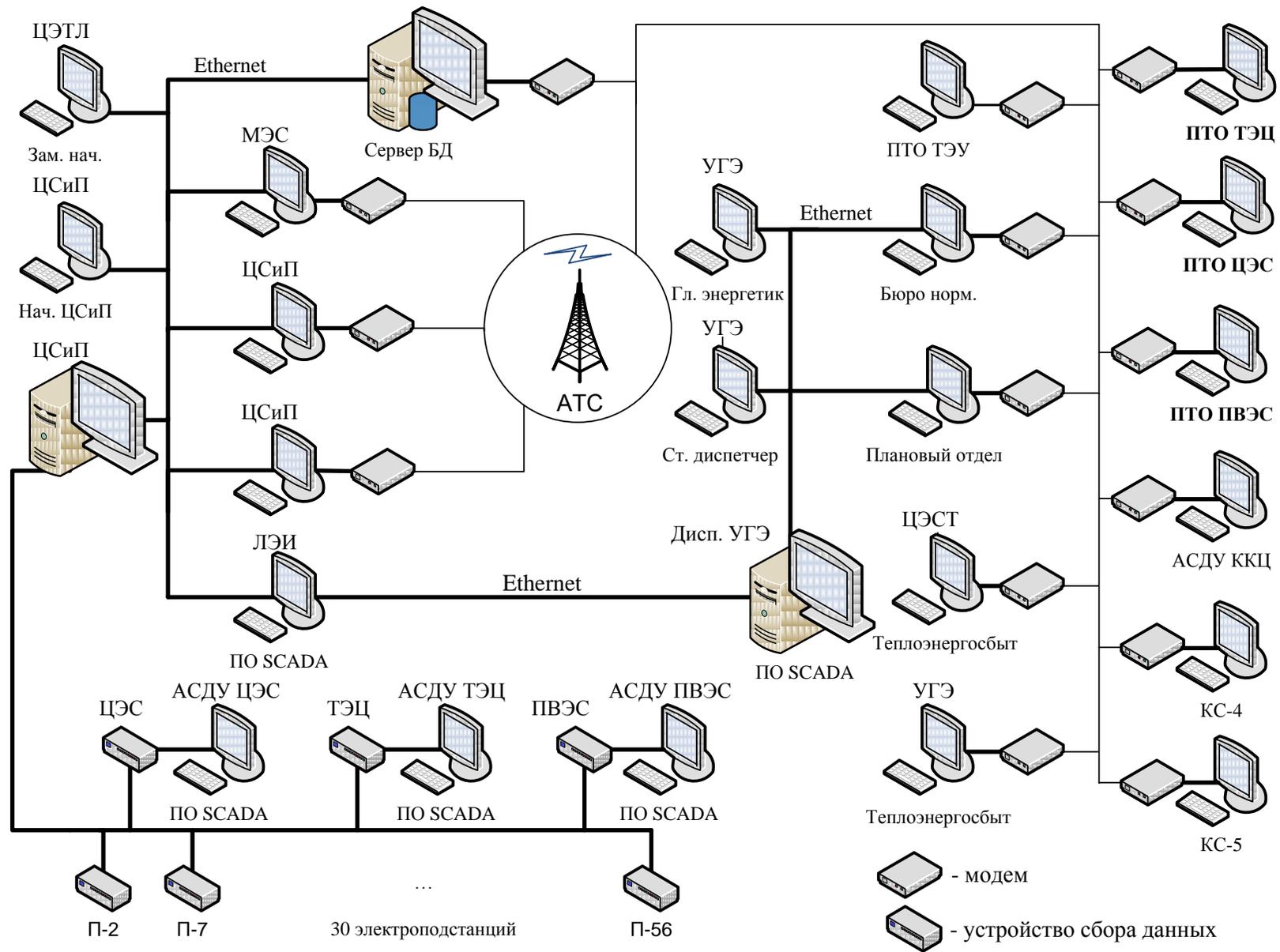


Рис. 1



Рис. 2

Прямая оперативная оценка удельного показателя энергетической эффективности ТП определяется выражением

$$a(t) = \frac{P(t)}{W(t)}, \quad (1)$$

где $P(t)$, $W(t)$ – текущий объем выпуска продукции и потребления ресурсов, соответственно.

Однако задача (1) является некорректно поставленной, так как текущий импульс энергии $W(t)$ вследствие инерционности ТП расходуется не на выпуск текущего объема продукции $P(t)$, а на будущий выпуск $P(t+\tau_3)$, где τ_3 – запаздывание ТП. В динамически выраженных случаях оценка (1) будет иметь произвольный характер и не отражать текущую энергоёмкость ТП.

Статистическая оценка удельного показателя энергоэффективности ТП имеет вид

$$a_{cp} = \frac{P_{cp}}{W_{cp}}. \quad (2)$$

Оценка (2) является корректной, но не отражает динамики процесса, поэтому не является оперативной.

Другой пример – вычисление оценок энергоэффективности в существующих моделях прогнозирующего управления. В этом случае оценка удельного показателя энергоэффективности будет иметь вид

$$a^{np}(t) = \frac{P^{np}(t)}{W(t)}. \quad (3)$$

где $P^{np}(t)$ – прогнозная оценка, рассчитанная при помощи динамической модели ТП. Подобная оценка является смещенной, так как в оценке $P^{np}(t)$ содержится методическая ошибка, обусловленная неточностью построенной модели процесса. Для сложных процессов построить точные модели затруднительно, поэтому методическая ошибка здесь может быть велика.

В работе предлагается новый подход к построению упреждающего управления в АСУ ТП, основанный на использовании статистически несмещенных оценок динамики технико-экономических показателей ТП.

Подход к построению упреждающих оценок показателей энергетической эффективности, предлагаемый в данной работе, основан на представлении динамических процессов преобразования потребляемых ЭР в выпускаемую продукцию в виде обобщенной оценочной модели (рис. 3), где $x(t)$ – вектор режимных параметров, $z(t)$ – возмущающие воздействия.

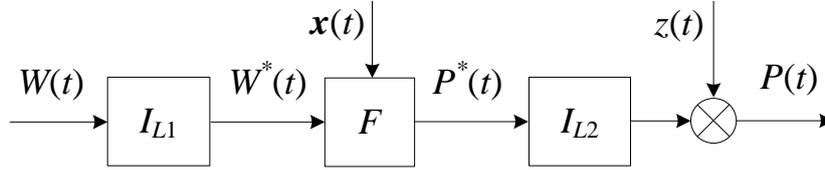


Рис. 3

Модель (рис. 3) основана на выделении в канале преобразования энергии $W(t) \rightarrow P(t)$ безынерционного звена F , в общем случае нелинейного, и линейных инерционных звеньев I_{L1}, I_{L2} .

На линейные звенья I_{L1}, I_{L2} накладываются условия

$$M_t \{W^*(t)\} = M_t \{W(t)\}; \quad (4)$$

$$M_t \{P^*(t)\} = M_t \{P(t)\}, \quad (5)$$

где $M_t \{\cdot\}$ – оператор усреднения по времени. Соотношения (4), (5) определяют условия несмещенности оценок $W^*(t), P^*(t)$ относительно величин $W(t), P(t)$ соответственно. Из этих условий, в частности, следует, что линейные звенья I_{L1}, I_{L2} имеют единичные коэффициенты передачи, а случайное возмущение $z(t)$ является центрированным. Модельные представления вида (рис. 3) могут быть построены для ТП широкого класса.

Для процесса на рис. 3 усредненная оценка энергетической эффективности имеет вид

$$a_{cp}(t) = \frac{P_{cp}(t)}{W_{cp}(t)} = \frac{M_t \{P(t)\}}{M_t \{W(t)\}} = \frac{M_t \{P^*(t)\}}{M_t \{W^*(t)\}}. \quad (6)$$

В качестве упреждающей оценки энергетической эффективности для процесса (рис. 3) предлагается использовать оценку

$$a^*(t) = \frac{P^*(t)}{W^*(t)} = \frac{I_{L2}^{-1} \{P(t)\}}{I_{L1} \{W(t)\}}, \quad (7)$$

где $I_{L2}^{-1} \{\cdot\}$ – линейный оператор, обратный оператору $I_{L2} \{\cdot\}$, построенный с условием фильтрации случайных возмущений $z(t)$. Оценка (7) является упреждающей, так как построена с использованием оператора I_{L2}^{-1} , обратного оператору I_{L2} , обладающего инерционным запаздыванием.

Положительным свойством упреждающей оценки (7) является то, что она удовлетворяет условиям несмещенности (4), (5), помехоустойчивости и отражает текущие преобразовательные свойства канала $W(t) \rightarrow P(t)$.

Для случая, когда преобразующее звено F канала $W(t) \rightarrow P(t)$ обладает экстремальными свойствами по режимным параметрам $\mathbf{x}(t)$, с использованием оценок (7) можно построить экстремальную систему управления ТП по критерию максимума энергетической эффективности. Общая схема системы экстремального управления (СЭУ) представлена на рис. 4.

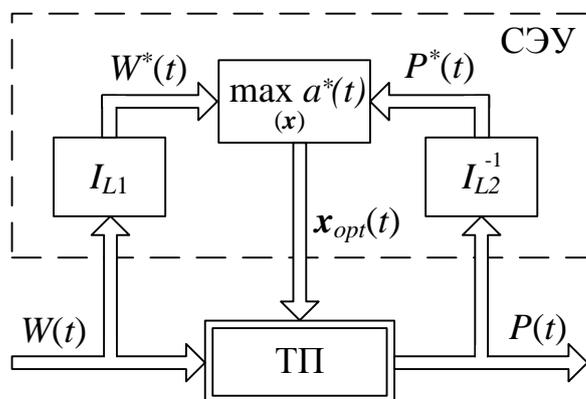


Рис. 4

Здесь $\max_{(x)} a^*(t)$ – задача определения оптимальных значений режимных параметров ТП по критерию максимума упреждающей оценки энергетической эффективности, решаемая известными методами.

Применение упреждающих оценок энергетической эффективности в автоматизированных системах управления позволяет повысить их быстродействие по сравнению с системами, использующими усредненные оценки. Это позволяет решать задачи экстремального управления в темпе процессов, протекающих в системе.

Преимущества использования предложенных упреждающих оценок технико-экономических показателей технологических процессов состоят в следующем:

1. Оперативное управления процессом ведется по текущим значениям упреждающих оценок показателей, что повышает качество оперативного управления.

2. Расширяются возможности использования моделей ТП в системах автоматической оптимизации. Для сложных систем здесь достаточно использовать упрощенные макромодели, что снижает сложность реализации упреждающего управления, делает его практически реализуемым для сложных ТОУ.

Построение обратных моделей динамики ТП

Рассматриваемый подход к построению упреждающего управления существенно базируется на построении обратных моделей динамики ТП. Рассмотрим решение данной задачи на основе двух подходов: а) решения обратных задач с использованием численных методов на основе регуляризации; б) аналитического решения с использованием методов оптимальной фильтрации.

Математически построение обратных моделей динамики ТП сводится к решению операторного уравнения

$$\Phi_m(W_t^*) = P_t, \quad (8)$$

где P_t – заданная реализация процесса $P(t)$; W_t^* – искомая реализация процесса $W^*(t)$; $\Phi_M(\cdot)$ – динамический оператор, представляющий модель ТП.

Данная задача является некорректно поставленной. Регуляризация некорректно поставленной задачи может быть выполнена с использованием специального регуляризирующего оператора R_M^{-1} :

$$\Phi_M(W_t') + R_M^{-1}W_t' = P_t. \quad (9)$$

Здесь W_t' – оценка искомой реализации W_t^* .

В этом случае решение задачи осуществляется по вычислительной схеме, приведенной на рис. 5, с использованием известных численных методов.

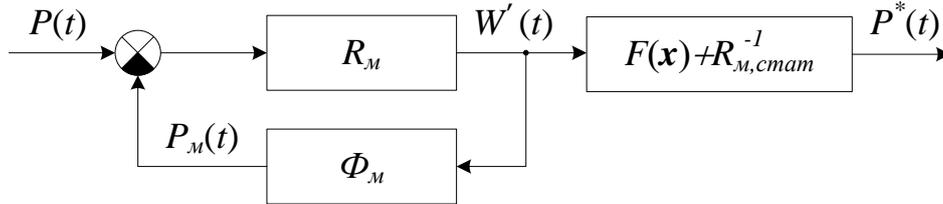


Рис. 5

Второй подход основан на аналитическом решении с использованием метода экспоненциальной фильтрации на фоне шумов. Пусть оператор ТП задан в общем дробно-рациональном виде со звеном запаздывания (это типовой подход к линейному представлению технологических процессов):

$$L(p) = \frac{\sum_{j=0}^m b_j p^j}{\sum_{i=0}^n a_i p^i} e^{-p\tau_3}, \quad m < n. \quad (10)$$

Формальное обращение оператора

$$L^{-1}(p) = \frac{\sum_{i=0}^n a_i p^i}{\sum_{j=0}^m b_j p^j} e^{p\tau_3}. \quad (11)$$

Структурная схема обратного оператора представлена на рис. 6.

В работе решена задача построения указанного прогнозирующего фильтра на фоне помех. Решение базируется на разложении сигнала $y(t)$ в полиномиальном базисе

$$y(t - \lambda) \approx \sum_{i=0}^n g_i(t) \lambda^i, \quad (12)$$

где λ – интервал ретроспективы, $g_i(t)$ – спектральные составляющие разложения. На основе метода экспоненциальной фильтрации был определен выход дифференциальной части фильтра с прогнозом:

$$h(t) \approx \sum_{i=0}^n (-1)^i g_i(t) \sum_{k=0}^i k! c_k a_k \tau_3^{i-k}, \quad (13)$$

где c_k – биномиальные коэффициенты.

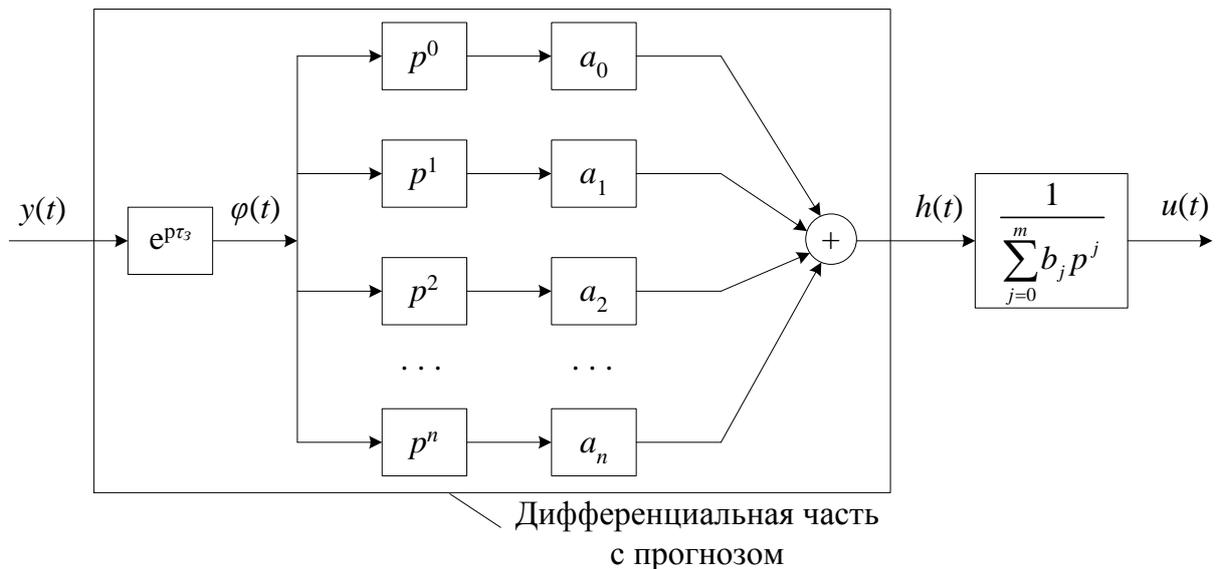


Рис. 6

В результате была получена следующая структура обратного оператора, приведенная на рис. 7.

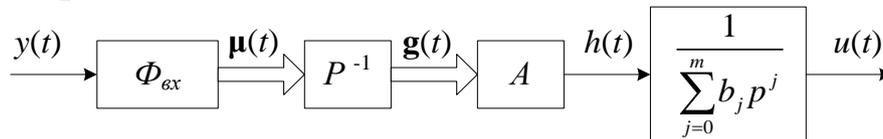


Рис. 7

Здесь: Φ_{ex} – формирующий фильтр моментов входного сигнала; P^{-1} – обратная матрица корреляционных коэффициентов; A – матрица коэффициентов дифференциальной части обратного оператора; $\mu(t) = (\mu_0(t), \mu_1(t), \dots, \mu_n(t))^T$ – вектор моментов входного сигнала; $g(t)$ – вектор координатных функций разложения.

В работе была рассмотрена в общем случае задача реализации обратного оператора на фоне шумов.

В случае белого шума данная задача сводится к нахождению безусловного минимума функционала Лагранжа

$$D_0 - \sum_{i=0}^n 2\gamma_i \int_0^{\infty} \tau^i w(\tau) e^{-c\tau} d\tau, \quad (14)$$

где γ_i – неопределенные множители Лагранжа, D_0 – дисперсия сигнала на выходе фильтра при действии белого шума.

Оптимальная весовая функция определяется уравнением

$$w(\tau) = \sum_{i=0}^n \gamma_i \tau^i e^{-c\tau}, \quad (15)$$

где γ_i определяются из условий:

$$\int_0^{\infty} \lambda^i w(\lambda) d\lambda = \sum_{k=0}^i (-1)^i k! c_k a_k \tau_3^{i-k}. \quad (16)$$

На фоне «цветных» помех дисперсия (центрированный случайный процесс с гауссовским распределением) на выходе фильтра определяется функционалом

$$D_z = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} K_z(\tau - \lambda) w(\tau) w(\lambda) d\tau d\lambda. \quad (17)$$

Здесь $K_z(\tau)$ – корреляционная функция «цветного» шума.

Заметим, что корреляционной функции $K_z(\tau)$ в частотной области соответствует частотный спектр шума $S_z(\omega)$, который образуется на основе прохождения белого шума через формирующий фильтр с передаточной функцией $F(s)$:

$$S_z(\omega) = F^*(j\omega)F(j\omega). \quad (18)$$

Для «цветного» шума постановка задачи нахождения оптимальной весовой функции динамического звена сводится к нахождению минимума функционала

$$(1 - \alpha)D_z + \alpha D_0 - \sum_{i=0}^n 2\gamma_i \int_0^{\infty} \tau^i w(\tau) e^{-c\tau} d\tau, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad (19)$$

где α – интенсивность фона белого шума, который вводится для регуляризации постановки задачи. При $\alpha = 1$, задача минимизации функционала (19) совпадает с предыдущей. При $\alpha = 0$, задача минимизации функционала (19) является некорректно поставленной. В этом случае малым отклонениям в исходных данных могут соответствовать большие отклонения в решении. Выбор значения параметра регуляризации α необходимо осуществлять на основе компромисса между точностью и устойчивостью решения.

В целом задача минимизации функционала (19) соответствует постановке задачи оптимальной фильтрации по Винеру. Решением задачи является оптимальная передаточная функция фильтра, удовлетворяющая условию физической осуществимости:

$$W(s) = \frac{\sum_{i=0}^n \gamma_i c \Phi_i(-c + s)}{(1 - \alpha)F(s) + \alpha}, \quad (20)$$

где неопределенные множители Лагранжа γ_i определяются из условий (16).

На системном уровне АСУ ТП рассмотренные упреждающие оценки динамики технико-экономических показателей могут быть использованы в оперативно-диспетчерском управлении и в системах автоматической оптимизации.

В случае оперативного управления на экран диспетчера выводятся текущие значения технико-экономических показателей ТП, их упреждающие оценки, а также кумулятивная оценка экономии ресурсов, полученная в результате упреждающего управления.

В системах автоматической оптимизации упреждающие оценки рекомендуется использовать в качестве критериев оптимизации технологических процессов в нестационарных режимах.

Третья глава посвящена повышению эффективности использования топлива в котельных агрегатах на основе регулирования подачи воздуха в топку котла по критерию максимума текущего КПД.

Общая схема предложенной системы автоматического управления режимами барабанного котла представлена на рис. 8.

(рис. 8, в); Q_e – расход воздуха; $\mathbf{x}_1 = \{p_{\bar{o}}, D_{\bar{o}}, h'', h_{г.э.}'', W_{н.в.}\}$, $\mathbf{x}_2 = \{B_{нз}, B_{\partial z}, Q_H^{нз}, Q_H^{\partial z}, P_e\}$, $\mathbf{x}_3 = \{D_{нн}, B_{нз}, B_{\partial z}\}$ – векторы режимных параметров, где $p_{\bar{o}}$ – давление в барабане котла; $D_{\bar{o}}$ – паропроизводительность барабана; h'' – энтальпия пара в барабане; $h_{г.э.}''$ – энтальпия воды водяного экономайзера; $W_{н.в.}$ – расход питательной воды; $D_{нн}$ – выработка перегретого пара; $Q_H^{нз}$ – калорийность природного газа; $Q_H^{\partial z}$ – калорийность доменного газа; P_e – давление воздуха после воздухоподогревателя; BQ – вычислитель сигнала Q_m' ; BO_2 – вычислитель сигнала O_2^H ; $B\eta$ – вычислитель приращения КПД $\Delta\eta_m$ при изменении подачи воздуха; γ_O – коэффициент, определяющий скорость экстремальной настройки системы автоматического регулирования по критерию максимума КПД, D – дискретный интегратор, вычисляющий оптимальную коррекцию Δy_O^{opt} задающего воздействия y_O^H по критерию максимума КПД; $W_{pz}(p)$, $W_{pe}(p)$ – передаточные функции регуляторов подачи природного газа и воздуха соответственно; y_{xz}^* , $y_{xв}^*$ – задания положений исполнительных механизмов (ИМ) шиберов (Ш) природного газа и воздуха соответственно; e_{xz} , $e_{xв}$ – сигналы ошибки по положению ИМ природного газа и воздуха соответственно; $W_{pzx}(p)$, $W_{pвx}(p)$ – передаточные функции регуляторов положения ИМ подачи природного газа и воздуха соответственно; u_{xz} , $u_{xв}$ – управляющие воздействия по положению шиберов природного газа и воздуха соответственно.

Вычисление сигнала Q_m' осуществляется на основе обратной модели динамики циркуляционного контура котла:

$$Q_m' = \frac{1}{A_1} \cdot \frac{dp_{\bar{o}}}{dt} + (D_{\bar{o}} \cdot h'' - W_{н.в.} \cdot h_{г.э.}'') - A_2 \cdot (D_{\bar{o}} - W_{н.в.}) \quad (21)$$

Здесь сигнал Q_m' является упреждающей оценкой нагрузки котла; A_1 – коэффициент влияния теплоэнергетического дисбаланса на давление в барабане; A_2 – коэффициент влияния материального дисбаланса на давление в барабане. Вычисление производной в формуле (21) осуществляется на основе метода экспоненциальной фильтрации.

В процессе функционирования котельного агрегата параметры топливных газов могут изменяться. Особо это относится к параметрам доменного газа, давление которого и калорийность могут изменяться в широких пределах. В этих условиях режим работы котельного агрегата может значительно отличаться от оптимального режима, соответствующего максимальному КПД топочных процессов. Для обеспечения оптимального режима работы котельного агрегата целесообразно использовать экстремальную настройку системы автоматического регулирования по критерию максимума КПД топочных процессов.

Текущий поток тепловой энергии вычисляется по формуле:

$$Q_{вх}(t) = B_{нз}(t) \cdot Q_H^{нз}(t) + B_{\partial z}(t) \cdot Q_H^{\partial z}(t). \quad (22)$$

На практике калорийность природного газа относительно постоянна, калорийность доменного газа представляет собой случайный процесс, который бу-

дем характеризовать математическим ожиданием $Q_{H0}^{\partial z}$ и среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_n^{\partial z}$. В этих условиях текущий поток тепловой энергии (22) может быть представлен в виде случайного процесса:

$$Q'_{ex}(t) = B_{n_z}(t) \cdot Q_n^{n_z}(t) + B_{\partial z}(t) \cdot Q_{H0}^{\partial z}(t) + B_{\partial z}(t) \cdot z(t), \quad (23)$$

где $z(t)$ – центрированная случайная величина.

Тепловыделение в топке определяется по формуле (21). Текущее значение составляющей КПД, характеризующей топочный процесс, можно оценить на основе соотношения:

$$\eta_m(t) = \frac{Q'_m(t)}{Q_{ex}(t - \tau_3(t))}. \quad (24)$$

где $\tau_3(t)$ – поправка на неучтенное запаздывание сигнала $Q_{ex}(t)$ относительно $Q'_m(t)$, определяемая как решение экстремальной задачи

$$\tau_3(t) = \arg \max_{\{\tau_3\}} \{M_t(\Delta Q_{ex}(t - \tau_3) \Delta Q'_m(t))\}. \quad (25)$$

Смысл экстремальной задачи состоит в том, что на ее основе по параметру τ_3 в каждый момент времени t определяется максимум коэффициента корреляции между отклонениями $\Delta Q_{ex}(t - \tau_3)$, $\Delta Q'_m(t)$ от средних значений.

Зная текущее значение КПД (24), можно оценить степени влияния действующих режимных факторов на отклонения КПД ($\Delta \eta_m$) от среднего значения. Для решения задач настройки системы регулирования при оценке текущего КПД топочных процессов используется линеаризация:

$$\eta_m(t) = \eta_{m,cp}(t) + \Delta \eta_m, \quad (26)$$

где среднее значение КПД определяется формулами:

$$\eta_{m,cp}(t) = \frac{Q'_{m,cp}(t)}{Q_{ex,cp}(t)}, \quad Q'_{m,cp}(t) = M_t\{Q'_m(t)\}, \quad Q_{ex,cp}(t) = M_t\{Q_{ex}(t)\},$$

Влияние режимных факторов оценивается на основе упреждающего соотношения

$$\Delta \eta_m = a_1(t) \cdot \Delta Q_{ex}(t - (\tau_3 - \Delta \tau_y)) + a_2(t) \cdot \Delta P_g(t - (\tau_3 - \Delta \tau_y)), \quad (27)$$

где

$$a_1(t) = \frac{\partial \eta_m}{\partial Q_{ex}(t - (\tau_3 - \Delta \tau_y))}; \quad a_2(t) = \frac{\partial \eta_m}{\partial P_g(t - (\tau_3 - \Delta \tau_y))}. \quad (28)$$

Здесь $\Delta Q_{ex}(t)$, $\Delta P_g(t)$ – соответственно отклонение входного теплового потока и давления воздуха от среднего значения; $\Delta \tau_y$ – интервал упреждения.

Определение коэффициентов влияния $a_1(t)$, $a_2(t)$ находится на основе решения задачи оценки неизвестных коэффициентов зависимости (27) по критерию минимума среднеквадратической ошибки с учетом случайного характера объемов подачи и калорийности доменного газа.

Коэффициенты влияния отклонения подачи топлива и подачи воздуха на КПД котла служат индикаторами оптимальности процесса горения в топке котла.

Применение экстремальной системы автоматического регулирования нагрузки котлов и подачи воздуха, использующей упреждающие оценки, позволяет осуществлять в следящем режиме оптимизацию топочных процессов по критерию максимума КПД (брутто) при возмущающих колебаниях параметров доменного газа. Реализация на практике экстремальной системы на котле ст. №5 ЦЭС ОАО «ММК» позволила повысить КПД до 2–4% в зависимости от параметров режимов.

В четвертой главе исследованы вопросы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в турбоагрегатах. Задача повышения эффективности использования энергетических ресурсов на тепловых электростанциях (ТЭС) во многом связана с оптимизацией распределения тепловой нагрузки между турбинными агрегатами. Оптимальное перераспределение тепловой нагрузки позволяет минимизировать общее потребление топлива ТЭС при заданных объемах выработки тепловой и электрической энергии. Решение задачи повышения эффективности работающих на общий коллектор турбинных агрегатов связано с построением фактических энергетических характеристик агрегатов с учетом данных эксплуатации и нормативных характеристик, а также оптимизации нагрузки турбин в реальном времени.

Рассмотрим задачу определения эффективных энергетических характеристик оборудования на основе данных испытаний и эксплуатации. Реальные данные эксплуатации характеризуются большим разбросом. При этом для таких факторов, как потребление энергоресурсов, представляет интерес нижняя граница данных, которая определяет наиболее эффективные неулучшаемые решения при заданных ограничениях на объемы выработки энергетической продукции.

Выделение эффективных энергетических характеристик на основе статистических данных требует использования специального математического аппарата. Типовой метод наименьших квадратов здесь не подходит, так как он позволяет выделить усредненные характеристики, а не эффективные. Здесь необходимо использовать специальные методы кластеризации данных.

В работе предложен алгоритм решения указанной задачи при неопределенной информации в исходных данных эксплуатации.

Рассмотрим задачу оптимизации нагрузки параллельно работающих турбинных агрегатов по показателю энергетической эффективности.

Рассмотрим постановку задачи оптимизации. Для эффективного управления режимами параллельно работающих турбоагрегатов необходимо знать их энергетические характеристики, которые представляют собой зависимости объемов потребления пара от объемов выработки электрической и тепловой энергии, а также режимных факторов.

Постановку задачи оптимизации сформулируем для нормированных величин. Целью задачи оптимизации является минимизация потребления пара

$$\min d_0 = (n-1) \frac{D_{cp}}{D_{\max} - D_{cp}} + \sum_{i=1}^n d_i^p, \quad (29)$$

где D_{cp} , D_{max} – соответственно средняя и максимальная величина пара, потребляемого турбинами; d_0 – общее расчетное потребление пара блоком турбин; d_i^p – расчетное значение потребления пара i -ой турбиной, которое определяется на основе следующего соотношения

$$d_i^p = a_{0i} + a_{1i}w_{эi}^* + a_{2i}d_{Ti}^*, \quad (30)$$

где a_{ji} – неизвестные коэффициенты зависимости; $w_{эi}^*$ – упреждающая оценка электрической энергии, вырабатываемой i -ой турбиной; d_{Ti}^* – упреждающая оценка расхода пара на теплофикацию для i -ой турбины.

Решение задачи (29) осуществляется известными математическими методами.

Ограничения задачи:

1) на потребление пара турбиной, исходя из следующих областей границы нормативной паровой характеристики:

– первая граница (режим с нулевым теплофикационным отбором)

$$d_0 \geq g_{1i} + h_{1i}w_{э}, \quad (31)$$

– вторая граница (ограничение на максимальный расход в конденсатор)

$$d_0 \geq g_{2i} + h_{2i}w_{э}, \quad (32)$$

где g_{1i} , h_{1i} , g_{2i} , h_{2i} – коэффициенты, определяющие границы.

С учетом (30) ограничения (31), (32) на потребление пара турбиной выражаются следующими соотношениями:

– первая граница: $a_{0i} + (a_{1i} - h_{1i})w_{эi}^T + a_{2i}d_{Ti}^T \geq g_{1i}$,

– вторая граница: $a_{0i} + (a_{1i} - h_{2i})w_{эi}^T + a_{2i}d_{Ti}^T \geq g_{2i}$.

2) на выработку электрической энергии

$$w_{э}^p = w_{э0}, \quad (33)$$

где $w_{э0}$ – заданное значение электрической энергии, которое необходимо вырабатывать блоком турбин; $w_{э}^p$ – общая выработка электрической энергии блоком турбин, которая определяется из следующего соотношения

$$w_{э}^p = (n-1) \frac{w_{э}^{cp}}{w_{э}^{\max} - w_{э}^{cp}} + \sum_{i=1}^n w_{эi}^*, \quad w_{эi}^* \leq w_{эi}^{\max}, \quad (34)$$

где $w_{эi}^{\max}$ – максимально возможная выработка электроэнергии i -ой турбиной, которая определяется по нормативной паровой характеристике.

3) на расход пара теплофикационного отбора

$$d_{Ti}^{\min} \leq d_{Ti}^* \leq d_{Ti}^{\max}, \quad (35)$$

где d_{Ti}^{\max} , d_{Ti}^{\min} – соответственно максимально и минимально возможные расходы пара теплофикационного отбора.

4) на тепловую нагрузку

$$q_T^p = q_{T0}, \quad (36)$$

где q_{T0} – общая тепловая нагрузка блока турбин, которую необходимо вырабатывать; q_T^p – расчетная тепловая нагрузка блока турбин, которая определяется из следующего соотношения

$$q_T^p = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i u_i, \quad (37)$$

где c_i – неизвестные коэффициенты зависимости; u_i – расчетная величина, определяемая по следующему соотношению

$$u_i = a_{2i} d_{Ti}^*. \quad (38)$$

На основе приведенных соотношений разработана программа «ТГ-ПАР» оптимальной нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов по данным эксплуатации по критерию минимума потребления пара блоком турбин.

Кроме того, разработана программа мониторинга резервов энергетической эффективности теплоэнергетических процессов электрических станций, основанная на обработке данных эксплуатации блока энергетических котлов и паровых турбин. Программа осуществляет в реальном времени оценку резервов повышения эффективности теплоэнергетических процессов электрических станций. Реализация указанных резервов может быть осуществлена с использованием автоматизированных систем управления режимами котлов и турбин, описанных выше.

Пятая глава посвящена разработке системы автоматизированного управления режимами паровых сетей металлургического предприятия с учетом показателей энергетической эффективности, формируемых методами обратной динамики и экспоненциальной фильтрации в реальном времени.

На рис. 9 представлена структурная схема потоковой модели рассматриваемой системы пароснабжения с контурами упреждающего управления по возмущениям от КУ-ККЦ и Вак-ККЦ.

Применение упреждающего управления по критерию энергетической эффективности позволило практически устранить потери пара на свечу, составляющие до 100 т/ч, при обеспечении требуемых расходов пара у других потребителей, что свидетельствует о высокой энергетической эффективности и целесообразности внедрения подобного управления в реальных системах пароснабжения металлургических предприятий. Так в частности, внедрение разработанной программной модели позволило снизить потери пара и повысить выработку активной электрической мощности станцией ST-3 ОАО «ММК» с 11,9 МВт до 13 МВт.

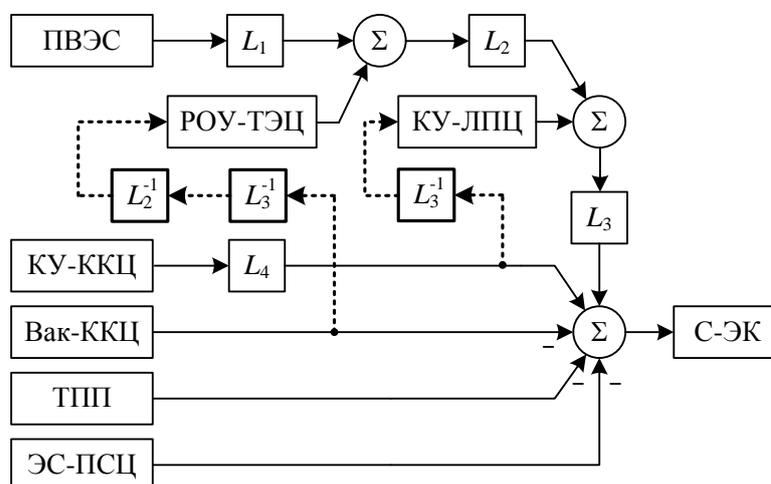


Рис. 9

Здесь ПВЭС – паровоздушная электростанция; РОУ-ЦЭС – редуционно-охлаждающая установка ЦЭС; КУ-ЛПЦ – котлы утилизаторы ЛПЦ; КУ-ККЦ – котлы утилизаторы ККЦ; Вак-ККЦ – вакууматор ККЦ; ТПП – технологические потребители пара; ЭС-ПСЦ – электростанция паросилового цеха; С-ЭК – свеча энергокорпуса; L_i – динамические операторы. Пунктирными линиями показаны вводимые контуры упреждающего управления на основе использования обратных динамических операторов L_i^{-1} .

Шестая глава посвящена разработке автоматизированной информационной системы мониторинга остаточного ресурса энергетического оборудования на основе концепции индивидуального обобщенного ресурса.

Рассмотрение проблемы прогнозирования остаточного ресурса стареющего технологического оборудования имеет прямое отношение к задаче повышения энергетической эффективности. Дело в том, что оптимальные по критериям энергетической эффективности режимы работы оборудования соответствуют, как правило, значениям параметров эксплуатации близким к граничным. Выход параметров за предельные значения ведет к возникновению аварий и прямым потерям энергетических ресурсов. При этом потери ресурсов могут достигать значительных масштабов. Ущерб здесь может перекрывать эффект от использования АСУ.

Оценка ресурса энергетического оборудования основывается на понятии режимных и параметрических частных ресурсов:

$$r_i(t) = \frac{|P_{\text{дон}}^{\text{ав}} - P_i(t)|}{|P_{\text{дон}}^{\text{ав}} - P_{\text{ном}}|}, \quad (39)$$

$$\rho_j(t) = 1 - b \int_{t_k}^t \varphi_j(\tau) d\tau, \quad (40)$$

$$\varphi_j = \begin{cases} |P_{\text{дон}}^{\pm} - P_j|, & P_j \notin [P_{\text{дон}}^-, P_{\text{дон}}^+]; \\ 0, & P_j \in [P_{\text{дон}}^-, P_{\text{дон}}^+], \end{cases} \quad (41)$$

где P_i – текущее значение i -ого параметрического показателя работоспособности; $P_{\text{дон}}^{\text{ав}}$ – предельное (аварийное) значение P_i ; $P_{\text{ном}}$ – номинальное (рабочее) значение P_i ; r_i – частный параметрический ресурс контролируемого агрегата по P_i ; P_j – j -й режимный показатель работоспособности; ρ_j – частный режимный ресурс контролируемого агрегата по показателю P_j ; φ_j – функция отклонения P_j от диапазона допустимых значений $[P_{\text{дон}}^-, P_{\text{дон}}^+]$; b – нормирующий коэффициент; $[t_k, t]$ – интервал времени с момента окончания k -го рассматриваемого ремонта до текущего момента времени.

Типовой подход к оценке текущего ресурса агрегата основан на выявлении критических мест, где возникает аварийная ситуация. Однако использование только частных оценок, несмотря на их чрезвычайную важность, не закрывает полностью проблему оценки состояния оборудования. В рамках АСУ ТП наряду с частными оценками целесообразно использовать обобщенные оценки, ко-

торые интегрально характеризуют эволюцию состояния объекта контроля во времени.

Приведем основные соотношения, по которым можно вводить обобщенные показатели работоспособности. При введении обобщенных показателей используются веса частных показателей работоспособности, которые характеризуют относительную величину потерь энергетических ресурсов при возникновении аварии по соответствующему частному показателю:

$$\alpha_i = \frac{c_i}{\sum_j c_j}, \quad \alpha_i \geq 0; \quad \sum_i \alpha_i = 1, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (42)$$

где c_i – потеря энергетических ресурсов при возникновении аварийной ситуации на энергетическом объекте

Вводятся следующие обобщенные показатели:

– средневзвешенный показатель работоспособности:

$$R_{cp}(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i R_i(t); \quad (43)$$

– средневзвешенное квадратичное отклонение показателей работоспособности:

$$\sigma_{cp}^2(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i (R_i(t) - R_{cp}(t))^2; \quad (44)$$

– взвешенный мультипликативный показатель по критическим ресурсам:

$$R_{kp}(t) = \prod_{i \in I_{kp}} R_i^{\alpha_i}(t). \quad (45)$$

На рис. 10 приведена типовая диаграмма эволюции обобщенных показателей. Данная диаграмма дает обзор эволюции состояния объекта контроля по средневзвешенному показателю, по средневзвешенному квадратичному показателю и выбросы по мультипликативному показателю, характеризующего аварийные состояния.

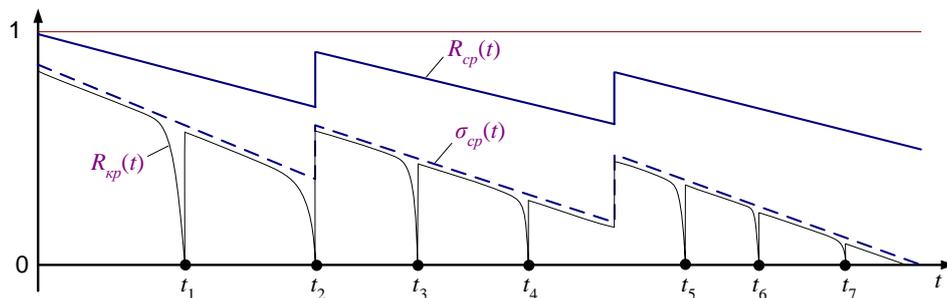


Рис. 10

Для прогноза траектории эволюции обобщенных показателей используется специализированная прогнозная модель, для которой цена ошибки зависит от ее знака.

Будем полагать, что поток отказов, характеризующийся временами случайных событий $\{t_1, t_2, t_3, \dots\}$, является ординарным с интенсивностью потока $\lambda(t)$.

Кроме того, будем полагать, что интенсивность потока событий $\lambda(t)$ зависит от следующих факторов: R_{cp} , σ_{cp} , t . Например, эта зависимость может описываться двойным экспоненциальным законом

$$\ln \ln \lambda(t) = a_0 + a_1 R_{cp} + a_2 \sigma_{cp} + a_3 t. \quad (46)$$

В общем случае зависимость имеет вид

$$y = f[\mathbf{a}](\mathbf{x}), \quad (47)$$

где $y = y(\lambda)$, $x \in \{ R_{cp}, \sigma_{cp}, t \}$.

По статистике аварийных событий составляется система неравенств:

– для пропуска аварийной ситуации

$$e_i^+ = f[\mathbf{a}](x_i) - y_i > 0: c_i^+, \quad (48)$$

– для ложной тревоги

$$e_i^- = f[\mathbf{a}](x_i) - y_i < 0: c_i^-, i \in I_{ct}. \quad (49)$$

Здесь e_i^+ – величина положительной невязки решения i -го неравенства (48), определяющая пропуск аварийной ситуации при оценке параметра $\lambda(t_i)$; c_i^+ – потери при пропуске аварии; e_i^- – величина отрицательной невязки решения i -го неравенства (49), определяющая ложную тревогу при оценке параметра $\lambda(t_i)$.

Ставится задача найти неизвестные значения структурных параметров \mathbf{a} искомой зависимости (47) по критерию минимума суммарной цены ошибочных решений

$$C = \sum_{i \in I_{ct}} c_i^+ \mu_i^+ + \sum_{i \in I_{ct}} c_i^- \mu_i^-, \quad (50)$$

где μ_i^+ , μ_i^- – характеристические функции неравенств (48), (49) соответственно.

Данная задача является известной задачей математического программирования.

Плотность вероятности наработки на отказ аппроксимируется гамма-распределением

$$b_k(\tau) = \frac{\left(\frac{k}{\theta}\right)^k}{\Gamma(k)} e^{-\frac{k\tau}{\theta}} \tau^{k-1}, \quad (51)$$

где $\theta = 1/\lambda^*$, λ^* – прогнозное значение интенсивности отказов; k – параметр распределения: $k = \theta^2/D_\tau^*$, D_τ^* – дисперсия интервалов времени между отказами; $\Gamma(k)$ – гамма-функция.

Разработанная методика реализована в программе для ЭВМ «Автоматизированная информационная система «Ресурс», предназначенной для автоматизации мониторинга и определения упреждающей оценки остаточного ресурса энергетического оборудования по текущему состоянию в реальном времени, а также ведения информационной базы данных по данному оборудованию. Программа АИС «Ресурс» внедрена в практику мониторинга остаточного ресурса и прогнозирования технического состояния энергетического оборудования ЦЭС ОАО «ММК».

Седьмая глава посвящена разработке автоматизированных систем повышения энергетической эффективности использования тепловой энергии потребителями теплофикационных систем.

Система теплоснабжения крупного промышленного предприятия, как правило, состоит из нескольких источников теплоснабжения, потребителей и соединяющих их трубопроводов тепловых сетей. В рамках диссертационного исследования разработан программный комплекс, предназначенный для оперативного моделирования и анализа режимов функционирования тепловых сетей промышленных предприятий, включающий в себя математическую макро модель тепловых сетей и программное обеспечение автоматизированного ввода, отображения и анализа данных с узлов учета тепла, установленных на тепловых вводах потребителей и источников теплоснабжения. Структура разработанной автоматизированной системы анализа режимов теплоснабжения САР-Т приведена на рис. 11.

На нижнем (полевом) уровне САР-Т находятся приборы учета (ПУ) тепла на источниках и у потребителей системы теплоснабжения, включающие в общем случае датчики расхода, температуры и давления теплоносителя. Данные о параметрах источников и крупных потребителей с приборов учета нижнего уровня поступают на сервер базы данных разработанной автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) «ПолиТЭР». Далее необходимые данные из базы данных АСДУ поступают на сервер базы данных САР-Т. Данные с теплосчетчиков мелких потребителей, не подключенных к АСДУ, поступают на рабочую станцию оператора, в функции которой входит автоматизированный ввод в базу данных САР-Т суточных архивов теплопотребления, считываемых с теплосчетчиков один раз за отчетный период (обычно месяц). Кроме того, в базу данных сервера САР-Т поступают данные из автоматизированной информационной системы (АИС) «Энергопаспорт», представляющей собой систему ведения энергопаспортов промышленных потребителей, содержащих технико-эксплуатационные показатели и проектные нагрузки.

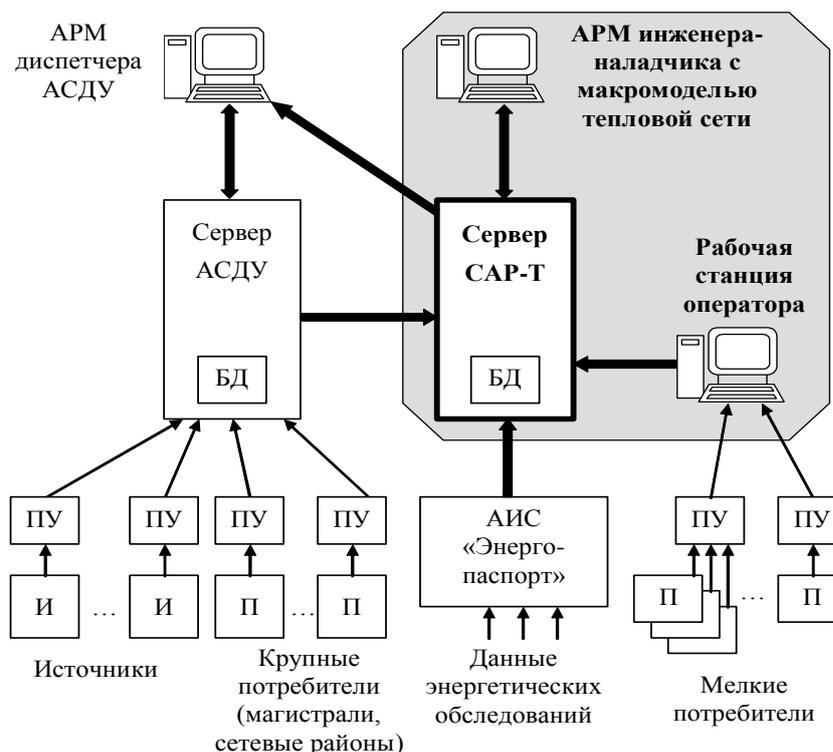


Рис. 11

Далее все необходимые данные из базы данных САР-Т поступают на автоматизированное рабочее место (АРМ) инженера-наладчика и диспетчера АС-ДУ. На АРМ инженера-наладчика функционирует специализированное программное обеспечение для оперативного моделирования и анализа режимов функционирования тепловых сетей. Программное обеспечение включает в себя математическую макромодель тепловых сетей, позволяющую проводить анализ режимов при различных вариантах структурных переключений в тепловых сетях в период подготовки проведения плановых ремонтных работ и ликвидации аварийных ситуаций. На основе предварительного моделирования режимов теплоснабжения с учетом фактических параметров теплоносителя и структуры тепловых сетей анализируются различные режимы теплоснабжения с точки зрения безопасности и экономичности, после чего инженер-наладчик принимает решение о реальном использовании того или иного режима.

Для настройки параметров модели по запросу инженера-наладчика периодически повторяется процедура идентификации макромоделей на основе текущих и архивных данных эксплуатации, а также экспертных оценок. Результаты идентификации и моделирования режимов хранятся в базе данных САР-Т. Программное обеспечение инженера-наладчика также позволяет проводить оценку экономичности использования теплоносителя у потребителей. Экономичность режимов теплоснабжения оценивается с помощью показателей, которые характеризуют использование теплового потенциала сетевой воды.

Таким образом, система автоматизированного анализа режимов теплоснабжения САР-Т обеспечивает выполнение следующих функций:

- ведение информационной базы данных технологических параметров и показателей функционирования системы теплоснабжения;
- идентификация и уточнение параметров макромоделей тепловых сетей;
- макромоделирование режимов теплоснабжения с учетом структурных переключений;
- расчет и графическое отображение результатов моделирования режимов и показателей экономичности теплоснабжения.

В работе предложена математическая модель теплового режима здания и методика идентификации модели по данным эксплуатации на основе применения метода экспоненциальной фильтрации. С использованием математической модели теплового режима зданий проведено моделирование и апробация разработанных способов автоматического регулирования отопления зданий.

Разработанные автоматизированные системы управления внедрены в теплоэнергетическом комплексе металлургического производства ОАО «ММК». Кроме того, разработанные системы внедрены для решения задач оперативно-диспетчерского управления тепло-, водо-, электроснабжением зданий и уличным освещением в г. Челябинске и в Челябинской области.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Автоматизированное управление технологическими процессами по критериям энергетической эффективности требует применения методов, основанных на упреждающих оценках эффективности процессов, определяемых исходя

из непосредственных измерений двух сторон оценочного отношения: текущих расходов энергетических ресурсов и объемов выходной продукции. Построение подобных оценок в реальном времени приводит к нетривиальным задачам, так как их решение должно существенно базироваться на комбинированных моделях прямой и обратной динамики управляемых процессов. При этом сам принцип управления, основанный на упреждающих оценках эффективности использования ресурсов до того, как эти ресурсы будут реально использованы или исчерпаны, является естественным условием достижения функциональной и эксплуатационной эффективности в сложных технологических комплексах.

2. В работе предложен новый подход и разработана методология упреждающего управления по критериям энергетической эффективности в теплоэнергетических комплексах металлургического производства. Методология основана на системном подходе к обеспечению эффективности технологических процессов и включает в себя:

- на технико-экономическом уровне – автоматизированную систему мониторинга резервов энергетической эффективности теплоэнергетических процессов электрических станций и автоматизированную систему прогнозирования обобщенного остаточного ресурса оборудования и приоритетного планирования ремонтно-профилактических работ;

- на уровне оперативного управления – экстремальные системы регулирования горения в топках энергетических котлов, программу оптимизации режимов турбин и программу мониторинга остаточного ресурса оборудования.

Указанные уровни управления системно увязаны между собой. При этом выявление резервов повышения энергетической эффективности на технико-экономическом уровне управления служит целям формирования задания для уровня оперативного управления, а также более низкого уровня – локальных систем автоматического регулирования. С другой стороны, анализ реальных данных эксплуатации позволяет корректировать оценки резервов повышения эффективности теплоэнергетических процессов на технико-экономическом уровне с точки зрения их достоверности и реализуемости.

3. В рамках предложенной методологии разработан новый метод автоматизированного управления технологическими процессами на основе упреждающих оценок показателей энергетической эффективности, отличающийся использованием комбинированных моделей прямой и обратной динамики технологических объектов управления, построенных с применением алгоритмов оптимальной фильтрации в условиях помех на основе спектрального подхода. Использование разработанных алгоритмов в системах автоматизированного управления технологическими процессами позволяет организовать в реальном времени автоматическую оптимизацию управления по критериям максимума показателей энергетической эффективности с учетом динамики процессов потребления энергетических ресурсов и выработки энергетической продукции.

4. Разработанные методы и алгоритмы были использованы для построения автоматизированной системы управления режимами в энергетических котлах электрических станций, утилизирующих ВЭР металлургического производства. Особенностью режимов работы данных котлов является нестабильность пара-

метров топливных газов (давление, калорийность). В этих условиях режим работы котельного агрегата может значительно отличаться от оптимального режима, соответствующего максимальному КПД котла. В работе предложен новый способ и система экстремального регулирования подачи воздуха в топку котла по критерию максимума КПД топочных процессов. Система построена на основе алгоритмов цифровой фильтрации, обеспечивающих на фоне помех вычисление достаточно точной оценки текущего КПД топочных процессов и влияния на КПД действующих факторов. Система обеспечивает инвариантность КПД топочных процессов к изменению калорийности топливных газов. На предложенный способ автоматической оптимизации процесса горения в топке барабанного парового котла получен патент РФ на изобретение.

5. Повышение эффективности использования энергетических ресурсов на тепловых электростанциях связано с задачей оптимизации распределения тепловой нагрузки между турбинными агрегатами, решение которой основано на построении фактических энергетических характеристик агрегатов с учетом данных эксплуатации и нормативных характеристик, а также оптимизации нагрузки турбин в реальном времени. В этой связи в работе предложена оригинальная методика и программное обеспечение моделирования и оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов с использованием упреждающих оценок параметров режимов. На основе разработанной методики и программного обеспечения, а также оригинального метода идентификации эффективных энергетических характеристик по данным эксплуатации и данным тепловых испытаний, построены эффективные энергетические характеристики турбогенераторов ТЭЦ и ЦЭС ОАО «ММК». Анализ полученных эффективных энергетических характеристик показал, что они с достаточной точностью отражают реальные граничные диаграммы режимов, соответствующие оптимальным значениям показателей энергетической эффективности.

6. Разработана программа мониторинга резервов энергетической эффективности теплоэнергетических процессов электрических станций, основанная на обработке данных эксплуатации блока энергетических котлов и паровых турбин. Программа осуществляет в реальном времени оценку резервов повышения эффективности теплоэнергетических процессов электрических станций. Реализация указанных резервов может быть осуществлена с использованием автоматизированных систем управления режимами котлов и турбин.

7. Предложена автоматизированная система упреждающего управления пароснабжением металлургического предприятия с учетом текущих оценок показателей эффективности на основе методов обратной динамики и экспоненциальной фильтрации. Разработана и реализована оригинальная программная модель сложной паровой сети с учетом динамики аккумуляции пара в двухфазной среде. Внедрение разработанной программной модели позволило снизить потери пара и повысить выработку активной электрической мощности станцией ST-3 ОАО «ММК» с 11,9 МВт до 13 МВт.

8. Оптимальные по критериям энергетической эффективности режимы работы оборудования соответствуют, как правило, значениям параметров эксплуатации близким к граничным. Выход параметров за предельные значения

ведет к возникновению аварий и прямым потерям энергетических ресурсов, ущерб от которых может достигать значительных масштабов, перекрывая эффект от использования АСУ. В этой связи в работе предложена концепция энергетической безопасности ТООУ, основанная на упреждающих оценках текущего обобщенного остаточного ресурса технологического оборудования по данным эксплуатации.

В рамках данной концепции разработаны:

– алгоритм оперативного распознавания предаварийных/аварийных ситуаций на контролируемом технологическом оборудовании и приоритетного планирования ремонтно-профилактических работ по критерию минимума энергетических потерь;

– оригинальное программное обеспечение автоматизированной информационной системы мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса (АИС «Ресурс») технологического оборудования в реальном времени. Программное обеспечение АИС «Ресурс» внедрено в практику мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса энергетического оборудования ЦЭС ОАО «ММК».

9. Разработана математическая модель теплового режима здания и методика идентификации модели по данным эксплуатации на основе применения метода экспоненциальной фильтрации. С использованием математической модели теплового режима зданий проведено моделирование и апробация разработанных способов автоматического регулирования отопления зданий, представленных в работе. На разработанные способы автоматического регулирования расхода тепла в системе центрального отопления зданий и автоматического регулирования горячего водоснабжения здания получены 2 патента РФ на изобретения.

Разработано методическое, алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной системы мониторинга и оперативного управления энергетической эффективностью потребителей систем теплоснабжения на основе макро моделирования, а также программное обеспечение диспетчерского контроля и управления технологическими процессами АСДУ «ПолиТЭР».

10. Разработанные автоматизированные системы управления внедрены в теплоэнергетическом комплексе металлургического производства ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Суммарный годовой экономический эффект от внедрения разработанных систем составляет более 45 млн. рублей. Кроме того, разработанные системы внедрены для решения задач оперативно-диспетчерского управления тепло-, водо-, электроснабжением зданий и уличным освещением в г. Челябинске и в Челябинской области.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Шнайдер, Д.А. Метод упреждающего управления сложными технологическими комплексами по критериям энергетической эффективности / Д.А. Шнайдер, Л.С. Казаринов // Управление большими системами. – 2011. – Выпуск 32. – С. 221–240.

2. Шнайдер, Д.А. Распределённое управление пароснабжением промышленных потребителей на основе динамической программной модели / Д.А. Шнайдер, П.Н. Дивнич, И.Е. Вахромеев // Автоматизация и современные технологии. – 2011. – №5. – С. 31–37.
3. Шнайдер, Д.А. Поход к оперативному анализу эффективности теплоснабжения зданий / Д.А. Шнайдер, В.В. Абдуллин, А.А. Басалаев // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2011. – Вып. 13. – №2 (219). – С. 70–73.
4. Казаринов, Л.С. Метод построения упреждающих оценок энергетической эффективности технологических процессов / Л. С. Казаринов, Д. А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. – Вып. 12. – №22 (198). – С. 57–62.
5. Автоматизация регулирования режимов пароструйного компрессора с применением SCADA-системы Trace Mode и теории нечетких множеств / Т.А. Барбасова, Д.А. Шнайдер, Ю.Б. Евчина, П.Н. Дивнич // Автоматизация и современные технологии. – 2010. – №1. – С. 3–7.
6. Казаринов, Л.С. Корреляционно-экстремальная система управления энергетической эффективностью паровых котлов / Л.С. Казаринов, Д.Ш. Шнайдер, А. В. Кинаш, О. . Колесникова // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. – Вып. 11. – №2 (178). – С. 81–85.
7. Вахромеев, И.Е. Метод упреждающего управления технологической паровой распределенной системой / И.Е. Вахромеев, Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. – Вып. 11. – №2 (178). – С. 86–91.
8. Шнайдер, Д.А. Организация распределенной системы управления уличным освещением на основе беспроводной сети стандарта ZigBee // Д.А. Шнайдер, Е.И. Крахмалев, А.В. Кинаш // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. – Вып. 11. – №2 (178). – С. 92–95.
9. Шнайдер, Д. А. Упреждающее управление по критерию энергетической эффективности в теплоэнергетических системах металлургического производства / Д. А. Шнайдер // Управление большими системами. 2009. – Выпуск 25. – С. 215–230.
10. Гойтина, Е.В. Оперативное управление экономичностью водяных тепловых сетей на основе макро моделирования / Е.В. Гойтина, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2009. – Вып. 10. – №26 (159). – С. 71–76.
11. Шнайдер, Д.А. Оперативное управление потоками энергетических ресурсов в производственных сетях с учетом динамики их аккумуляирования / Д. А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 8. – №17 (117). – С. 45–49.
12. Вахромеев, И. Е. и др. Автоматизированное управление процессами в охлаждающих установках электрических станций / И. Е. Вахромеев, Ю. Б. Евчина, Д. А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 8. – №17 (117). – С. 50-53.
13. Вернергольд, А.Р. Об оптимальном управлении процессом вельцевания цинковых кеков / А. Р. Вернергольд, Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 7. – №3 (103). – С. 54–56.

14. Оперативное регулирование экономичности горения в энергетических котлах / Л.С. Казаринов, Т.А. Игнатова, А.В. Кинаш, О.В. Колесникова, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 8. – №17 (117). – С. 21–23.

15. Казаринов, Л. С. Оперативное управление технологическими процессами с прогнозом показателей энергетической эффективности / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 8. – №17 (117). – С. 9–12.

16. Шнайдер, Д. А. Автоматизированная компрессорная установка / Д.А. Шнайдер, П.Н. Дивнич, Т.А. Барбасова // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 8. – №17 (117). – С. 54–57.

17. Казаринова, В.Л.. Паспортизация промышленных потребителей топливно-энергетических ресурсов с использованием средств автоматизации / В.Л. Казаринова, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 8. – №17 (117). – С. 58–60.

18. Шнайдер, Д.А. Автоматизированная система диспетчерского управления теплоснабжением зданий на основе полевых технологий / Д. А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 8. – №17 (117). – С. 29–32.

19. Шнайдер, Д.А. Построение расчетных характеристик пароструйного эжектора для оптимизации работы конденсационной установки ТЭЦ / Д.А. Шнайдер, И.Е. Вахромеев, П.Н. Дивнич, Т.А. Барбасова // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2007. – Вып. 6. – №23 (95). – С. 63–64.

20. Казаринов, Л.С. Математическое описание потоков энергоресурсов в сложных сетях с учетом динамики их аккумулярования / Л. С. Казаринов, О. В. Попова, Д. А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2007. – Вып. 5. – №7–(79). – С. 29–33.

21. Гойтина, Е.В. Автоматизированный анализ режимов тепловых сетей с использованием энергетических паспортов потребителей / Е.В. Гойтина, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2007. – Вып. 6. – №23 (95). – С. 65–66.

22. Гойтина, Е.В. Методика идентификации параметров модели тепловой сети по данным эксплуатации / Е.В. Гойтина, Д.А. Шнайдер // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – №9. – С. 20–22.

23. Гойтина, Е.В. Подход к автоматизированному анализу эффективности режимов теплоснабжения на основе макро моделирования / Е.В. Гойтина, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2007. – Вып. 5. – №7 (79). – С. 9–11.

24. Казаринов, Л.С. Метод оценки текущего состояния контролируемого оборудования в задаче оперативного планирования ремонтно-профилактических работ / Л. С. Казаринов, Д. А. Шнайдер, А. Р. Хасанов // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2006. – Вып.4. – №14(69). – С. 84–87.

25. Методика оптимизации потребления энергетических ресурсов на электрических станциях. / Л.С. Казаринов, Д.А. Безруков, О.В. Попова, Д.А. Шнайдер // Вестник

ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2004. – Вып.3. – №9(98). – С. 39–43.

26. Казаринов, Л.С. Метод гибкого приоритетного планирования ремонтных работ / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, А.Р. Хасанов // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2004. – Вып.3. – №9 (38). – С. 98–103.

27. Шнайдер, Д.А. Об оптимальной нагрузке агрегатов ТЭЦ / Д.А. Шнайдер, О.В. Попова, Д.А. Безруков // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2004. – Вып. 3. – №9(38). – С. 19–21.

28. Шишкин, М.В. Моделирование теплогидравлических систем в среде VisSim / М.В. Шишкин, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2004. – Вып.3. – №9 (38). – С. 120–123.

29. Шнайдер, Д.А. Об оптимизации режимов теплоснабжения промышленных объектов / Д.А. Шнайдер, Д.А. Безруков // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2003. – Вып. 2. – №4 (20). – С. 129–131.

30. Шнайдер, Д.А. Об оптимизации режимов тепловых сетей промышленных предприятий с использованием средств автоматизации // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2001. – №9 (09). – С. 71–75.

Авторские свидетельства и патенты

31. Пат. 2196274 Российская Федерация МПК7 F 24 D 19/10. Способ автоматического регулирования расхода тепла в системе центрального отопления здания / Д.А. Шнайдер, В.Ф. Постаушкин, Л.С. Казаринов, М.В. Шишкин. – №2001114732/06, заявл. 28.05.2001, опубл. 10.01.2003, Бюл. № 1

32. Пат. 2273800 Российская Федерация МПК7 F 24 D 17/00. Способ автоматического регулирования системы горячего водоснабжения / Д.А. Шнайдер, М.В. Шишкин, А.Р. Хасанов – №2001114732/06, заявл. 28.05.2001, опубл. 10.01.2003, Бюл. № 10

33. Пат. 2425290 Российская Федерация, МПК F 23 N 1/02. Способ автоматической оптимизации процесса горения в топке барабанного парового котла / Казаринов Л. С., Шнайдер Д.А. и др., заявл. 2009139582/06, опубл. 27.07.2011, Бюл. № 21

Монографии

34. Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки) / Л.С. Казаринов, Л.А. Копцев, Д.А. Шнайдер и др.; под. ред. Л.С. Казаринова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. – 228 с.

35. Автоматизированные системы управления энергоэффективным освещением / Л.С. Казаринов, Д. А. Шнайдер, Т.А. Барбасова и др.; под ред. Л. С. Казаринова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 208 с.

Статьи в других журналах и сборниках трудов, материалах конференций

36. Шнайдер, Д. А. Динамическая оценка показателей энергетической эффективности распределенных теплоэнергетических систем / Д.А. Шнайдер, И.Е. Вахромеев // Интеграция науки и производства. Сборник материалов 3-й международной научно-практической конференции Интеграция науки и производства, 31 мая 2010. – Тамбов: Тамбовпринт, 2010. – С. 56–59.

37. Шнайдер, Д.А. Автоматизированный ситуационный центр мониторинга энергоэффективности объектов ЖКХ // Научные труды международной заочной конференции, посвященной 15-летию со дня создания Регионального Уральского отделения

Академии Инженерных Наук им. А.М. Прохорова, «Инженерная поддержка инновации и модернизации» 1-10 декабря 2010 г.

38. Шнайдер, Д.А. Подход к построению адаптивных систем управления уличным освещением / Д.А. Шнайдер, Е.И. Крахмалев // Интеграция науки и производства. Сборник материалов 3-ей международной научно-практической конференции Интеграция науки и производства, 31 мая 2010. – Тамбов: Тамбовпринт, 2010. – С. 62–63.

39. Евчина, Ю.Б. Подход к математическому моделированию системы технического водоснабжения промышленного предприятия на основе макромоделирования / Ю.Б. Евчина, Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер // Материалы X Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ), 5 апр. 2010 г. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010. – С. 24–29.

40. Казаринов, Л.С. Анализ эффективности модернизации систем наружного освещения с применением светодиодных светильников и АСДУ / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, Е.И. Крахмалев // Материалы X Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ), 5 апр. 2010 г. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010. – С. 37–42.

41. Казаринов, Л. С. Математическая модель теплоэнергетической системы ТЭС металлургического предприятия / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, Е.А. Канашев, А. В. Кинаш // Материалы X Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ), 5 апр. 2010 г. / – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010. – С. 71–76.

42. Шнайдер, Д.А. Автоматизированная система диспетчерского управления на базе тепловычислителей ЭЛЬФ. Опыт внедрения в ЖКХ г. Троицка / Д.А. Шнайдер // 10-е Всероссийское совещание по энергосбережению. 4-я конференция Автоматизация инженерных систем в ЖКХ и промышленности, сборник докладов и статей; Екатеринбург, 7-8 апреля 2010 г. – Екатеринбург: Печатное поле, 2010. – С. 126–128.

43. Кинаш, А.В. Анализ режимов работы котлоагрегатов электростанции при использовании адаптивной системы оптимизации процессов горения в топке / А.В. Кинаш, Д.А. Шнайдер // Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского. Сборник материалов 4-й Международной научно-практической конференции. – Тамбов: Тамбовпринт, 2009. – С. 205–207.

44. Шнайдер, Д.А. Автоматизированная система диспетчерского управления ПолиТЭР. Опыт применения в жилищно-коммунальном хозяйстве / Д.А. Шнайдер // Межрегиональный специализированный форум-выставка ЖКХ. Проблемы и решения. Конференция-круглый стол Инновационные и энергосберегающие технологии в ЖКХ как основной приоритет коммунальной реформы ; сборник докладов – Челябинск: Центр международной торговли, 2009. – С. 34–35.

45. Шнайдер, Д.А. Моделирование динамических режимов парового аккумулятора / Д.А. Шнайдер, П.Н. Дивнич, И.Е. Вахромеев // Автоматизация в промышленности. – 2009. – №8. – С. 42–44.

46. Кинаш, А.В. Подход к оптимизации режимов работы котельного агрегата по текущему КПД / А. В. Кинаш, Д. А. Шнайдер // Материалы 2-й международной научно-практической конференции Интеграция науки и производства, г. Тамбов, 19–20 мая 2009. – С. 82–83.

47. Вахромеев, И.Е. Экспериментальные исследования режимов функционирования градирни турбинного участка ПСЦ ОАО «ММК» / И.Е. Вахромеев, Д.А. Шнайдер // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в

7-ти частях «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Часть 3 – С. 104–106.

48. Шнайдер, Д.А. Автоматизированные информационно-управляющие системы. Учебное пособие: в 2 ч. – Ч. 1. Автоматизированные информационно-управляющие системы. – Ч. 2. Автоматизация управления экономичностью теплоэнергетических и пиротехнологических процессов / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, Т.А. Барбасова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 294 с.

49. Казаринов, Л.С. Модель расчета энергопотоков в сетях с учетом динамики их аккумулирования / Л. С. Казаринов, О. В. Попова, Д. А. Шнайдер // XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий. Краткие сообщения. – Миасс: МСНТ, 2007. – С. 108.

50. Казаринова, В.Л. Автоматизация ведения энергетических паспортов потребителей топливно-энергетических ресурсов на промышленном предприятии / В. Л. Казаринова, Д. А. Шнайдер // Вып.2. Сб. тр. Международной науч.-техн. Конф. / под ред. Д.Х. Девятова. –Магнитогорск: Проф-Принт, 2007.

51. Копков, А.Г. Моделирование теплогидравлических режимов теплового пункта / А.Г. Копков, Д.А. Шнайдер // Материалы VI Междунар. Науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ), 7 апр. 2006 г.: В 5 ч. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. – Ч. 1. – 71 с.

52. Попова, О.В. Алгоритм расчета обобщенного показателя состояния контролируемого энергооборудования на основе нечеткой логики / О.В. Попова, А.Р. Хасанов, Д.А. Шнайдер // Материалы Всероссийской научно-практической Интернет-конференции Автоматизированные системы управления и информационные технологии. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2006. – С. 252–257.

53. Хасанов, А.Р. Подход к оценке и прогнозированию текущего состояния контролируемого оборудования в задаче оперативного планирования ремонтно-профилактических работ / А.Р. Хасанов, Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер // Всероссийская научно-практическая Интернет-конференция Автоматизированные системы управления и информационные технологии. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2006. – С. 257–265.

54. Шнайдер, Д.А. Экспертное нормирование показателей частных ресурсов энергоагрегатов с использованием нечеткой логики / Д.А. Шнайдер, А.Р. Хасанов // XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий. Тезисы докладов. – Миасс: МСНТ, 2006. – 82 с.

55. Хасанов, А.Р. Подход к оперативной оценке остаточного ресурса энергетического оборудования на основе использования генетического алгоритма / А.Р. Хасанов, Д.А. Шнайдер // XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий. Краткие сообщения. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 392 с.

56. Казаринова, В.Л. Идентификация эффективных производственных характеристик в АСУ ТП с использованием граничных оценок / В.Л. Казаринова, О. В. Попова, Д. А. Шнайдер // 3-я Всеросс. науч. конф.; Санкт-Петербург, 30 июня–2 июля 2005 г.; Сборник докладов в двух томах. – Том 2. – С. 199–206.

57. Шнайдер, Д.А. Автоматическая система регулирования режимов струйного подогревателя / Д.А. Шнайдер, Т.А. Барбасова // Механика и процессы управления. Труды XXXII Уральского семинара, г. Миасс, 24 дек. 2002 г. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2002. – с. 260–268.

58. Шнайдер, Д.А. Автоматизированная система мониторинга и управления технологическими процессами на основе сети MicroLan / Д.А. Шнайдер, М.В. Шишкин //

Новые программные средства для предприятий Урала ; выпуск 1 : Сб. тр. Региональной научно-технической конференции под ред. В.Д. Тутаровой – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2002. – С. 84–89.

59. Шнайдер, Д.А. Адаптивный регулятор отопления здания на основе искусственных нейронных сетей / Д.А. Шнайдер, М.В. Шишкин // Автоматизация и управление в технических системах : Сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – С. 131–134.

60. Ельфимовская, Е.В. Расчет гидравлических режимов в системах водяного теплоснабжения / Е. В. Ельфимовская, Д. А. Шнайдер // Автоматизация и управление в технических системах : Сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – С. 58–60.

61. Казаринов, Л.С. Адаптивное регулирование отопления здания / Л.С. Казаринов, В.Ф. Постаушкин, Д.А. Шнайдер // Энергосбережение на промышленных предприятиях : Материалы II Международной научно-технической конференции. – Магнитогорск: Дом печати, 2000. – С. 165–168.

62. Казаринов, Л.С. Автоматическое регулирование на тепловых вводах зданий в дефицитных режимах / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер // Энергосбережение в промышленности и городском хозяйстве: Сб. тез. докл. научн.-практ. конф. (14–15 июня). – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. С. 24–25.

63. Моделирование теплового режима здания / В.Ф. Постаушкин, Д.А. Шнайдер, П.В. Калинин, С.Т. Касюк // Системы автоматического управления: Сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – С. 66–73.

64. Казаринов, Л.С. Применение автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов – ключ к энергосбережению в системах централизованного теплоснабжения / Л. С. Казаринов, В.Ф. Постаушкин, Д.А. Шнайдер, М.В. Шишкин // Вестник энергосбережения Южного Урала. – Челябинск: Межрайонная типография, 2000. – №1. – С. 16–18.

65. Шнайдер, Д.А. Нечеткий регулятор для управления отоплением здания / Д.А. Шнайдер // Системы автоматического управления: Сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – С.74–79.

