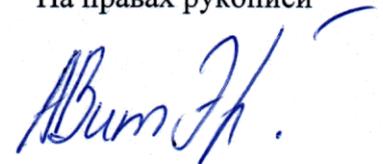


На правах рукописи



Алексеюк Виталий Эдуардович

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ  
РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск–2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Клер Александр Матвеевич**

Официальные оппоненты: **Данеев Алексей Васильевич**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский государственный университет путей сообщения", кафедра «Информационные системы и защита информации», профессор

**Елсуков Владимир Константинович**  
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Братский государственный университет", кафедра промышленной теплоэнергетики, профессор

Ведущая организация: **федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск**

Защита диссертации состоится «01» июня 2021 г. в 09:00 на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте ИСЭМ СО РАН <https://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2021-3/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 003.017.01,  
доктор технических наук, профессор



**Клер  
Александр Матвеевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Тепловые электрические станции (ТЭС), работающие на органическом топливе, продолжают составлять основу электроэнергетики Российской Федерации. Более того, сохраняется тенденция широкого использования органического топлива, преимущественно угля, для выработки электрической и тепловой энергии на ТЭС во всем мире. Следовательно, задачи повышения энергетической и экономической эффективности эксплуатации основного оборудования ТЭС являются одними из самых актуальных и заслуживают внимания.

Преимущества использования современных электронно-вычислительных машин для математического моделирования теплоэнергетических установок (ТЭУ) очевидны. Подробные математические модели исследуемых установок в сочетании с эффективными методами оптимизации их режимов работы позволяют без значительных капиталовложений заметно увеличить эффективность эксплуатации ТЭУ в первую очередь за счет уменьшения топливных издержек. Вопрос оптимизации параметров как отдельных агрегатов электростанции, так и ТЭС в целом, особенно актуален в связи с большой изношенностью установленного теплоэнергетического оборудования и переходом энергосистем к работе в условиях рыночных отношений.

Поиск наиболее эффективных путей решения проблем математического моделирования и оптимизации энергетических установок ведется достаточно давно, однако остается незаконченным до настоящего времени. Важно отметить, что с одной стороны имеются значительные успехи в решении задач моделирования, оценивания состояния и диагностики трубопроводных, электроэнергетических и других технических систем. Но с другой стороны, проблемы идентификации параметров, оценивания состояния и оптимизации режимов работы сложных теплоэнергетических установок, таких как современные угольные энергоблоки, газотурбинные, парогазовые установки и другие агрегаты ТЭС, практически не нашли приемлемого решения из-за сложности их математических моделей, а также в связи с отсутствием эффективных методов, алгоритмов и компьютерных программ решения необходимых математических задач.

Результаты решения вышеперечисленных задач имеют важное самостоятельное значение и играют существенную роль для качественного решения проблем управления ТЭУ, например, для более эффективного распределения нагрузок между агрегатами ТЭС и оптимального управления режимами работы ТЭУ и ТЭС.

**Степень разработанности темы.** Вопросам математического моделирования и оптимизации теплоэнергетических установок, а также других технических систем (электроэнергетические, трубопроводные, химические), посвящены труды значительного числа российских и зарубежных ученых таких, как: Андрющенко А.И., Андрюшин А.В., Аракелян Э.К., Бабаян Д.М., Бурков А.Г., Вульман Ф.А., Гамм А.З., Голуб И.И., Гришин Ю.А., Горнштейн В.М., Деканова Н.П., Жарков П.В., Иванов А.А., Кафаров В.В., Клер А.М., Колосок И.Н., Корнеева З.Р., Крохин Г.Д., Левенталь Г.Б., Максимов А.С., Макарьчян В.А., Михеев А.В., Наумов Ю.В., Новицкий Н.Н., Ноздренко Г.В., Овчинников Ю.В., Палагин А.А., Попырин Л.С., Потанина Ю.М., Резникова Р.С., Рузанков В.Н., Скрипкин С.К., Степанова Е.Л., Супруненко М.Я., Тюрина Э.А., Хорьков Н. С., Чалбышев А.В., Щербич В.И., Шашков О.К., Шмидт Р.А., Шубенко Шубин Л.А., Ali Chaibakhsh, El-Masri M.A., Hotes H., Grkovic V., Karim Salahshoor, José Barranquero, Jizhen Liu, Spakovsky M.R., Takeya K., Tarton P.Y., Tomasz Kajdanowicz, Xiaolong Jiang, Yasui H., Zens R., и другие. Были разработаны подходы к автоматизации математического моделирования, нелинейной оптимизации параметров и технологических схем, оцениванию состояния энергетических систем, решены многие практически важные задачи различными оптимизационными методами.

Заметного успеха в математическом моделировании теплоэнергетических установок и решении задач идентификации параметров математических моделей ТЭУ с учетом

их текущего состояния, оценивания состояния и оптимизации режимов их функционирования достигли в разные годы сотрудники Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН) Клер А.М., Деканова Н.П., Михеев А.В, Максимов А.С., Степанова Е.Л., П.В. Жарков и другие. В работах этих авторов рассматривались различные подходы к идентификации параметров математических моделей достаточно простых паровых котлов и турбоустановок, а также приводились методики оценивания состояния и оптимизация режимов их функционирования.

Следует отметить, что в большинстве работ, направленных на идентификацию параметров математических моделей ТЭУ, не уделяется достаточного внимания вопросу анализа исходных данных (замеров контрольных параметров, используемых для настройки коэффициентов математической модели) на предмет наличия среди них ошибочных замеров, содержащих грубые погрешности измерений. Кроме того, ранее не исследовался вопрос влияния несовершенства математических моделей исследуемых теплоэнергетических установок на точность выполняемой идентификации и последующих оптимизационных расчетов. Таким образом, существует необходимость в разработке комплексной методики, предназначенной для совместного выполнения расчетов по идентификации параметров математических моделей ТЭУ с высокой точностью, оценивания состояния режимов работы установок и выполнения оптимизационных исследований.

**Целью работы** является разработка комплексной методики идентификации параметров математических моделей существующих теплоэнергетических установок, оценивания состояния и выполнения оптимизации режимов их функционирования. Данная методика предполагает использование одной модели исследуемой энергоустановки для решения всех вышеперечисленных задач в одном цикле расчетов, с применением разработанного программно-вычислительного комплекса.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **основные задачи исследования**.

1. Создание трехэтапной методики идентификации параметров математических моделей существующих теплоэнергетических установок с учетом их текущего состояния, выполняемой по результатам замеров в нескольких режимах работы энергоустановки.

2. Разработка новой постановки оптимизационной задачи при идентификации параметров математических моделей ТЭУ, обеспечивающей ускорение сходимости и повышения точности решения поставленной задачи за счет использования оригинальной целевой функции, в оптимальной точке соответствующей сумме взвешенных наименьших модулей отклонений замеряемых параметров.

3. Разработка критериев точности, предназначенных для оценки относительных невязок как отдельных замеряемых контрольных параметров, так и суммарной невязки при решении задачи идентификации параметров математической модели ТЭУ.

4. Построение подробной математической модели современного угольного паротурбинного энергоблока, пригодной для выполнения оптимизационных расчетов модифицированным градиентным методом.

5. Разработка программно-вычислительного комплекса, предназначенного для математического моделирования, выполнения идентификации параметров математических моделей ТЭУ, оценивания состояния и проведения оптимизационных исследований режимов их функционирования.

6. Выполнение цикла необходимых оптимизационных расчетов для апробации разработанных методик, а именно идентификация параметров математической модели энергоблока по результатам замеров контрольных параметров, оптимизация режимов его работы и оптимизационные расчеты, применительно к исследуемому в работе энергоблоку.

**Объектом исследований** являются действующие теплоэнергетические установки на органическом топливе, на примере пылеугольного паротурбинного энергоблока с промежуточным перегревом пара мощностью 225 МВт.

**Предметом исследования** являются математические модели теплоэнергетических установок и численные методы, направленные на согласованную настройку по результатам замеров математических моделей действующих энергоустановок, оценивание состояния и оптимизацию их режимов работы.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем.

- Разработана трехэтапная методика идентификации параметров математических моделей действующих теплоэнергетических установок с учетом их текущего состояния по результатам замеров, выполненных в нескольких режимах работы, позволяющая более эффективно выявлять замеры с грубыми погрешностями измерений и значительно повысить точность настройки математических моделей энергоустановок.

- Предложена новая постановка оптимизационной задачи при идентификации параметров математических моделей ТЭУ с оригинальной целевой функцией, в оптимальной точке соответствующей сумме взвешенных наименьших модулей отклонений измеряемых параметров, обеспечивающей ускорение сходимости и повышение точности решения поставленной задачи.

- Разработан метод учета влияния изменения режима работы ТЭУ на значения настраиваемых коэффициентов эффективности в математических моделях соответствующих элементов расчетной схемы установки, представленной на примере математической модели отсека турбоустановки.

- Создан подход к оцениванию суммарной погрешности идентификации математической модели ТЭУ, состоящей как из погрешности датчиков, используемых для получения замеров, так и погрешности самой математической модели исследуемой установки.

- Разработаны критерии точности, предназначенные для сравнительной оценки невязок как отдельных измеряемых контрольных параметров, так и суммарной остаточной невязки при решении задачи идентификации параметров математических моделей ТЭУ.

- Построена подробная математическая модель современного паротурбинного пылеугольного энергоблока мощностью 225 МВт, пригодная для выполнения оптимизационных расчетов модифицированным градиентным методом, и разработана модель теплового и гидравлического расчета конденсатора турбины.

- Разработан программно-вычислительный комплекс, предназначенный для математического моделирования, выполнения расчетов по идентификации параметров математических моделей ТЭУ, оцениванию состояния и проведения оптимизационных исследований режимов их функционирования.

**Практическая значимость** выполненного исследования заключается в том, что разработанная комплексная методика позволяет выполнять более эффективную и точную настройку математических моделей ТЭУ и ТЭС по результатам замеров контрольных параметров, оценивание состояния режимов работы теплоэнергетических установок и выполнения оптимизационных расчетов различной размерности, что может применяться при моделировании, оценивании состояния и оптимизации режимов работы действующих энергетических установок и электростанций, а также других технических систем.

**Методология и методы исследования.** В настоящей работе используется методология системных исследований сложного теплоэнергетического оборудования. Все вычисления, выполненные в рамках данной работы, основаны на применении градиентных методов нелинейной оптимизации, позволяющие при малом времени расчетов получать все необходимые данные: значение целевой функции, оптимизируемых параметров, ограничений задач оптимизации и критериев эффективности. Математическое моделирование и оптимизационные исследования ТЭУ проводились с использованием разработанного в ИСЭМ СО РАН программно-вычислительного комплекса СМПП-ПК.

**Автор защищает.**

1. Трехэтапную методику идентификации параметров математических моделей существующих теплоэнергетических установок по результатам замеров контрольных па-

раметров в нескольких режимах работы, позволяющую более эффективно выявлять грубые погрешности измерений и значительно повысить точность настройки моделей ТЭУ.

2. Новую постановку оптимизационной задачи при идентификации параметров математических моделей ТЭУ, обеспечивающую ускорение сходимости и повышение точности решения поставленной задачи, основанную на применении в качестве целевой функции суммы взвешенных наименьших модулей измеряемых параметров.

3. Метод, позволяющий учесть влияние изменения режима работы ТЭУ на изменение настраиваемых коэффициентов в соответствующих математических моделях элементов расчетной схемы исследуемой установки.

4. Подход к оцениванию суммарной погрешности идентификации математической модели ТЭУ, состоящей как из погрешности датчиков, используемых для получения замеров, так и погрешности самой математической модели исследуемой установки.

5. Разработанные критерии точности, предназначенные для оценки невязок как отдельных измеряемых контрольных параметров, так и суммарной невязки при решении задачи идентификации параметров математических моделей ТЭУ

6. Подробную математическую модель современного пылеугольного паротурбинного энергоблока мощностью 225 МВт, пригодную для оптимизационных расчетов с помощью модифицированного градиентного метода.

7. Программно-вычислительный комплекс, предназначенный для математического моделирования и выполнения расчетов, направленных на идентификацию параметров математических моделей ТЭУ, оценивание состояния режимов работы и проведения оптимизационных исследований.

8. Результаты выполненных оптимизационных расчетов, апробирующих разработанные автором методики и повышающие эффективность функционирования исследуемого в работе энергоблока.

#### **Личный вклад автора.**

- При активном участии автора разработана трехэтапная методика идентификации математических моделей существующих теплоэнергетических установок с учетом их текущего состояния, а также предложена новая постановка оптимизационной задачи при идентификации параметров математических моделей ТЭУ.

- Автором создан метод, позволяющий учесть влияние режима работы ТЭУ на изменение настраиваемых коэффициентов в соответствующих математических моделях элементов расчетной схемы установки.

- При участии автора создан подход к оцениванию суммарной погрешности идентификации с учетом как погрешности датчиков, используемых для получения измеряемых параметров, так и погрешности расчетной методики и математической модели установки.

- Автором разработаны критерии точности, позволяющие оценить выполненную настройку математической модели ТЭУ с учетом замеров и проводить относительные сравнения разных постановок оптимизационных задач, направленных на идентификацию параметров математических моделей энергоустановок.

- Автором лично построена подробная математическая модель современного пылеугольного паротурбинного энергоблока мощностью 225 МВт и разработана математическая модель теплового и гидравлического расчета конденсатора турбины.

- Автором разработан программно-вычислительный комплекс, предназначенный для математического моделирования и выполнения расчетов, направленных на идентификацию параметров математических моделей ТЭУ, оценивания состояния и проведения оптимизационных исследований режимов функционирования исследуемых энергоустановок.

- Лично автором проведены все необходимые расчеты для апробации разработанных методик и выполнения оптимизационных исследований режимов работы рассматриваемой энергоустановки, выполнен анализ по результатам работы и сделаны выводы.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует пунктам паспорта научной специальности ВАК 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: пункт 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента»; пункт 6 «Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента»; пункт 8. «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования».

**Степень достоверности и апробации результатов.** Разработанная математическая модель теплоэнергетической установки и полученные научные результаты имеют высокую степень достоверности в виду использования в настоящей работе математических моделей элементов котельного агрегата и турбоустановки, основанных на апробированных методах расчёта теплоэнергетического оборудования, таких как нормативные методы теплового, гидравлического и аэродинамического расчета котельного агрегата, уравнения энергетического и теплового баланса энергоносителей, уравнения теплопередачи, теплообмена и другие. Адекватность используемой математической модели энергоблока подтверждается ее соответствием реальным режимам функционирования, а также согласованностью полученных на настроенной математической модели ТЭУ результатов с замерами, выполненными на действующей установке.

Основные положения данной работы обсуждались на следующих конференциях. Конференция-конкурс научной молодежи «Системные исследования в энергетике» (Иркутск 2016 – 2018 гг.); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (Иркутск 2016 – 2018 гг.); Междисциплинарная научно-практическая конференция Иркутского научного центра на английском языке (Иркутск, 2017 г.); Всероссийская молодежная конференция с международным участием "Системные исследования в энергетике - 2019" (Иркутск, 2019 г.); ENERGY-21: Sustainable Development & Smart Management / Энергетика XXI века: Устойчивое развитие и интеллектуальное управление (Иркутск, 2020 г.)

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 научно-исследовательских работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных результатов диссертационных исследований на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, и 2 статьи, индексируемых в международной базе данных Scopus.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, содержащего 134 источника, и трех приложений. Работа изложена на 158 страницах текста, содержит 15 рисунков и 20 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы настоящего исследования. Математическое моделирование и оптимизация режимов работы существующих ТЭС и входящих в их состав ТЭУ, работающих на сжигаемом топливе, является единственным эффективным методом их исследования и повышения эффективности их функционирования. Существует необходимость в комплексной методике, объединяющей в себе математическое моделирование ТЭУ, настройку разработанных моделей с учетом текущего состояния теплоэнергетических установок (идентификация параметров), оценивания состояния и выполнения оптимизационных исследований режимов функционирования.

**В первой главе** приведен анализ публикаций, выполненных в различные годы отечественными и зарубежными исследователями по данной тематике. В данной главе при-

водится описание трехэтапной методики идентификации параметров математических моделей ТЭУ, приводятся математические формулировки задач каждого из этапов методики, в том числе и новая постановка оптимизационной задачи, основанная на методе взвешенных наименьших модулей, а также предлагаемый автором подход к оценке достигнутой точности настройки математической модели с учетом текущего состояния моделируемой установки и разработанные критерии точности.

Недостаточно широкое использование эффективных методов математического моделирования и оптимизации при управлении режимами работы ТЭС обусловлены рядом трудностей, среди которых можно отметить значительную сложность математических моделей современных ТЭУ и необходимость настройки этих моделей на изменяющееся в течении времени фактическое состояние оборудования и отсутствие необходимых программно-вычислительных комплексов (ПВК), реализующих необходимые математические расчеты. Анализ работ, посвященных исследованиям методик идентификации параметров математических моделей ТЭУ указывает на присущие им недостатки, оказывающие сильное влияние на точность настройки математических моделей ТЭУ по результатам замеров контрольных параметров.

Предлагаемая в данной работе трехэтапная методика идентификации позволяет более эффективно выявлять замеры параметров с грубыми погрешностями измерений, повысить точность настройки математических моделей, оценить корректность построения используемых при исследовании математических моделей и получить относительную оценку точности выполненной идентификации. Все оптимизационные расчеты, необходимые для получения расчетных параметров математической модели ТЭУ, значения целевой функции и ограничений-неравенств выполнялись модифицированным градиентным методом, разработанным в ИСЭМ СО РАН. Данный метод позволяет решать оптимизационные задачи больших размерностей (сотни оптимизируемых параметров, сотни и тысячи ограничений-неравенств) с высокой точностью.

На первом этапе решения задачи идентификации предлагается выявлять и исключать из дальнейшего расчета неточные замеры контрольных параметров, значения которых находятся далеко за пределами заявленной точности средств измерений, использованных во время испытаний оборудования или снятия показаний. Для выявления таких замеров необходимо решить задачу минимизации дополнительного оптимизируемого параметра  $\psi$ , отвечающего условию  $\psi > 0$ , который на данном этапе идентификации в оптимальной точке соответствует значению модуля максимального относительного отклонения (невязки) среди всех замеряемых контрольных параметров в одном конкретном режиме работы исследуемой установки. Относительная невязка замеряемых контрольных параметров – это разница между рассчитанным на математической модели значением контрольного параметра и значением, замеренным на реальном оборудовании при его испытании, отнесенная к среднеквадратичному отклонению значения датчика, используемого для получения данного замера.

Важно отметить, что на первом этапе идентификации зачастую неизвестны значения настраиваемых коэффициентов математической модели. В связи с этим предлагается задаться некоторыми средними значениями коэффициентов, учитывая физическое состояние элементов ТЭУ и другие известные особенности исследуемой установки. Вектор настраиваемых коэффициентов не включается в состав оптимизируемых параметров решаемой задачи на первом этапе идентификации. Проведенные с использованием данного подхода расчеты показали высокую эффективность при выявлении «плохих» замеров.

При рассмотрении задачи идентификации параметров математических моделей ТЭУ выделяются следующие векторы параметров:  $x_3$  – вектор параметров, замеряемых на исследуемой установке и являющихся информационно-входными (задаваемыми) для математической модели;  $y_3$  – вектор параметров, замеряемых на установке и являющиеся информационно-выходными (вычисляемыми) для математической модели;  $x_n$  – вектор режимных параметров, которые не замеряются на реальной установке, но являются ин-

формационно-входными (задаваемыми) для модели и  $\theta$  – вектор настраиваемых коэффициентов математической модели.

Математическая постановка первого этапа идентификации параметров математической модели ТЭУ в общем виде может быть представлена следующим образом:

$$\min_{x_n, x_z, \psi} \psi, \quad (1)$$

при условиях:

$$H(y_z, x_n, x_z, \theta) = 0, \quad (2)$$

$$G(y_z, x_n, x_z, \theta) \geq 0, \quad (3)$$

$$x_{zj} - \psi \cdot \sigma_{xj} \leq \overline{x_{zj}} \leq x_{zj} + \psi \cdot \sigma_{xj}, \quad (4)$$

$$y_{zk} - \psi \cdot \sigma_{yk} \leq \overline{y_{zk}} \leq y_{zk} + \psi \cdot \sigma_{yk}, \quad (5)$$

$$\sigma_{xj} = (S_{xj} \cdot \alpha_{xj}) / 3, \quad (6)$$

$$\sigma_{yk} = (S_{yk} \cdot \alpha_{yk}) / 3, \quad (7)$$

$$j = 1, \dots, N, \quad (8)$$

$$k = 1, \dots, M, \quad (9)$$

где  $H$  – вектор-функции ограничений-равенств, включающий в себя все уравнения математической модели ТЭУ и входящих в ее состав элементов расчетной схемы установки;  $G$  – вектор-функции ограничений-неравенств, учитывающий физические и режимные ограничения на работу реального оборудования;  $\psi$  – дополнительный оптимизируемый параметр, в оптимальной точке соответствующий модулю максимального относительного отклонения замеряемых параметров в одном рассматриваемом режиме работы установки (с верхней чертой – вектор параметров, полученных путем их измерения на установке, без верхней черты – вектор параметров, определяемых с помощью математической модели установки);  $j$  – порядковый номер замеряемого параметра  $x_{zj}$ ;  $N$  – размерность вектора  $x_z$ ;  $k$  – порядковый номер замеряемого параметра  $y_{zk}$ ;  $M$  – размерность вектора  $y_z$ ;  $\sigma_{xj}$ ,  $\sigma_{yk}$  – среднеквадратичные отклонения замеряемых параметров  $x_{zj}$  и  $y_{zk}$  соответственно;  $S_{xj}$ ,  $S_{yk}$  – верхние пределы измерения датчиков, используемых для получения замеров  $x_{zj}$  и  $y_{zk}$  соответственно;  $\alpha_{xj}$ ,  $\alpha_{yk}$  – классы точности датчиков, используемых для получения замеров  $x_{zj}$  и  $y_{zk}$  соответственно.

В данной работе используется так называемое правило "трех сигм", так как доверительная вероятность в данном случае равняется 0,997. Это позволяет с достаточным основанием утверждать, что все возможные случайные погрешности измерения, распределенные согласно нормальному закону распределения погрешностей замеряемых параметров, практически не превышают по абсолютному значению трех среднеквадратичных отклонений ( $3\sigma$ ). В уравнениях (4; 5) вместо множителя равного 3,0 используется минимизируемый дополнительный параметр  $\psi$ , изначально задаваемый большим числом 50–100. Это необходимо для того, чтобы учесть, как погрешности используемых средств измерений, так и возможные ошибки в математических моделях элементов исследуемой ТЭУ. В процессе оптимизационного расчета (1) этот дополнительный оптимизируемый параметр стремится к значению 3,0, но на практике он зачастую принимает большее значение из-за погрешностей моделирования и приближенных значений настраиваемых коэффициентов.

Для определения ошибочных замеров необходимо найти активные ограничения на отклонение значения замеряемого на установке параметра от вычисляемого в результате расчета математической модели ТЭУ. Если найденное оптимальное значение коэффициента  $\psi$  намного превышает значение равное 3,0 (то есть максимальная относительная невязка между замером и расчетом контрольного параметра намного больше  $3\sigma$ ), то это указывает на наличие в данном конкретном режиме работы оборудования одного или не-

скольких «плохих» замеров. Значение замера, входящего в это активное ограничение, после инженерного анализа полученных результатов, может быть помечено как ошибочное и исключено из дальнейших расчетов. Оптимизационный расчет повторяется до тех пор, пока из вектора замеряемых параметров рассматриваемого режима работы установки не будут выявлены, подтверждены и исключены все замеры с грубыми погрешностями измерения. Опыт решения оптимизационных задач первого этапа идентификации показывает, что, если оптимальное значение параметра  $\psi$  не превышает значение 5,0, «плохие» замеры в рассматриваемом режиме отсутствуют.

Таким образом, на первом этапе идентификации необходимо добиться того, чтобы в каждом из рассматриваемых режимов работы энергоустановки оптимальное значение максимальной относительной невязки приняло значение не большее 5,0. Обычно выбирают от трех до шести установившихся режимов работы ТЭУ с различной нагрузкой. Важно, чтобы эти режимы находились в одном относительно небольшом временном интервале, чтобы считать настраиваемые коэффициенты математической модели постоянными.

Следует отметить, что не всегда представляется возможным выполнить расчеты на данном этапе идентификации. Это касается тех теплоэнергетических установок, где нет достаточного количества датчиков и, следовательно, нет достаточного количества исходной информации, чтобы выполнить идентификацию для одного отдельного режима. Необходимо иметь переопределенную систему, в которой количество уравнений, связывающих невязки замеряемых параметров с вектором независимых переменных было бы больше количества независимых (оптимизируемых) параметров. В противном случае, когда система уравнений является недоопределенной, необходимо сразу переходить на второй этап идентификации, выполняемый на нескольких режимах совместно. В таком случае количество уравнений в системе будет достаточным для успешного решения поставленной задачи.

На втором этапе методики идентификации математическая модель исследуемой установки проверяется на наличие ошибок моделирования и устранения оставшихся грубых погрешностей измерений. Постановка оптимизационной задачи подобна задаче, выполняемой на первом этапе, за исключением того, что она решается для всех рассматриваемых режимов совместно. Кроме того, на данном этапе идентификации в состав оптимизируемых параметров решаемой задачи необходимо включить вектор настраиваемых коэффициентов математической модели  $\theta$ . Целевой функцией оптимизационной задачи является дополнительный оптимизируемый параметр  $\psi$ , отвечающий условию  $\psi > 0$ , в оптимальной точке соответствующий модулю максимального относительного отклонения замеряемых параметров во всех рассматриваемых режимах работы исследуемой установки совместно. Постановка оптимизационной задачи имеет следующий вид:

$$\min_{x_n^i, x_s^i, \theta, \psi} \psi, \quad (10)$$

при условиях

$$H(y_s^i, x_n^i, x_s^i, \theta) = 0, \quad (11)$$

$$G(y_s^i, x_n^i, x_s^i, \theta) \geq 0, \quad (12)$$

$$x_{zj}^i - \psi \cdot \sigma_{xj} \leq \overline{x_{zj}^i} \leq x_{zj}^i + \psi \cdot \sigma_{xj}, \quad (13)$$

$$y_{zk}^i - \psi \cdot \sigma_{yk} \leq y_{zk}^i \leq y_{zk}^i + \psi \cdot \sigma_{yk}, \quad (14)$$

$$j = 1, \dots, N, \quad (15)$$

$$k = 1, \dots, M, \quad (16)$$

$$i = 1, \dots, R, \quad (17)$$

где обозначения векторов и переменных те же, что и в выражениях (1 – 9);  $i$  – порядковый номер режима работы установки;  $R$  – количество установившихся режимов работы исследуемой установки, участвующих в оптимизационном расчете.

Расчеты показали, что решение данной задачи позволяет выявить некорректное описание математической моделью процессов, протекающих в энергоустановке и указывает на «узкие» места в расчетной схеме модели. Если в результате решения оптимизационной задачи имеются параметры, отклонение которых от замеров в разных режимах работы оборудования значительно отличается, то это говорит об отсутствии необходимого коэффициента в списке уточняемых или свидетельствует о неточности построения самой математической модели. Кроме того, незначительные потоки теплоносителей, которыми пренебрегли во время построения математической модели исследуемого оборудования, могут внести дополнительную погрешность при идентификации. Таким образом, на данном этапе расчетов есть возможность внести необходимые изменения в структуру модели, описывая особенности исследуемого теплоэнергетического оборудования.

Если были успешно устранены все замеры с грубыми погрешностями измерений и математическая модель адекватно рассчитывает процессы, происходящие в элементах исследуемой установки, то значение коэффициента  $\psi$  будет принимать значение близкое к значению 3,0, и все существующие невязки контрольных параметров можно объяснить погрешностью датчиков. Система уравнений на втором этапе идентификации в подавляющем большинстве случаев будет переопределенной в силу использования в оптимизационном расчете замеряемых параметров из нескольких режимов работы установки.

На третьем этапе методики идентификации параметров математической модели ТЭУ минимизируется сумма квадратов относительных невязок контрольных параметров во всех рассматриваемых режимах работы ТЭУ. Оптимизационная задача, решаемая на данном этапе, имеет следующий вид:

$$\min_{x_n^i, x_s^i, \theta} \sum_{i=1}^R \left[ \sum_{j=1}^N \frac{(x_{sj}^i - \bar{x}_{sj}^i)^2}{\sigma_{sj}^2} + \sum_{k=1}^M \frac{(y_{zk}^i - \bar{y}_{zk}^i)^2}{\sigma_{yk}^2} \right], \quad (18)$$

где условия оптимизационной задачи те же, что и в выражениях (10 – 17).

Третий этап идентификации необходим для того, чтобы добиться максимально возможного сближения расчетов математической модели с замерами, выполненными на реальном оборудовании. Важно подчеркнуть, что значение максимальной относительной невязки замеряемых параметров  $\psi$ , полученное на втором этапе идентификации, фиксируется и вводится как константа в выражения для ограничений-неравенств замеряемых контрольных параметров (13, 14). Это необходимо для того, чтобы исключить увеличение максимальной невязки при решении оптимизационной задачи третьего этапа идентификации параметров математической модели исследуемой установки. Минимизация целевой функции (18) на третьем этапе идентификации позволяет добиться снижения всех относительных невязок замеряемых контрольных параметров (даже самых незначительных), а не только максимальной относительной невязки, как на втором этапе. Именно в этом заключается принципиальная разница в построении оптимизационной задачи на втором и третьем этапах идентификации.

Стоит отметить, что представление целевой функции оптимизационной задачи как суммы квадратов относительных невязок замеряемых параметров применялось в более ранних работах ИСЭМ СО РАН и исследованиях других организаций. Несмотря на широкое распространение данная постановка задачи не является наиболее эффективной, учитывая вероятную овражность квадратичной целевой функции и, как следствие, снижение эффективности использования градиентного метода поиска оптимального решения. Кроме того, классический метод наименьших квадратов (МНК), способствует «перераспределению» существующих невязок замеряемых параметров, что усложняет инженерный анализ полученных расчетов и в некоторых случаях приводит к неоднозначным результатам.

Учитывая вышесказанное, на третьем этапе методики можно применить альтернативный параметрический подход методов надежной регрессии. Подход заключается в

предположении, что отклонения измеряемых параметров соответствуют смеси нормальных распределений погрешностей. В таком случае наблюдается загрязненное нормальное распределение, в котором большинство наблюдений основано на заданном нормальном распределении, но небольшая часть (обычно меньше 10%) – на нормальном распределении с гораздо более высокой дисперсией. При таком распределении погрешностей метод наименьших модулей (МНМ) покажет лучший результат, чем МНК. Таким образом в настоящей работе впервые предпринята попытка применить МНМ при идентификации параметров математических моделей действующих теплоэнергетических установок. При этом предложена оригинальная постановка оптимизационной задачи, целевая функция которой в оптимальной точке равняется минимуму суммы модулей относительных невязок, являясь при этом гладкой функцией на всей области допустимых значений вектора оптимизируемых параметров.

В настоящей работе предлагается новая постановка оптимизационной задачи третьего этапа идентификации, основанная на методе взвешенных наименьших модулей, в которой в качестве целевой функции используется сумма дополнительных оптимизируемых параметров  $\psi_x^i$ ,  $\psi_y^i$ , отвечающих условиям  $\psi_x^i > 0$ ,  $\psi_y^i > 0$ , которая в оптимальной точке решения задачи соответствует минимальной сумме модулей относительных отклонений измеряемых параметров. С учетом вышеизложенного подхода математическая задача третьего этапа идентификации принимает следующий вид:

$$\min_{x_n^i, x_s^i, \theta, \psi_x^i, \psi_y^i} \sum_{i=1}^R \left[ \sum_{j=1}^N \psi_{xj}^i + \sum_{k=1}^M \psi_{yk}^i \right], \quad (19)$$

при условиях:

$$H(y_s^i, x_n^i, x_s^i, \theta) = 0, \quad (20)$$

$$G(y_s^i, x_n^i, x_s^i, \theta) \geq 0, \quad (21)$$

$$x_{zj}^i - \psi_{xj}^i \cdot \sigma_{xj} \leq x_{zj}^i \leq x_{zj}^i + \psi_{xj}^i \cdot \sigma_{xj}, \quad (22)$$

$$y_{zk}^i - \psi_{yk}^i \cdot \sigma_{yk} \leq y_{zk}^i \leq y_{zk}^i + \psi_{yk}^i \cdot \sigma_{yk}, \quad (23)$$

$$j = 1, \dots, N, \quad (24)$$

$$k = 1, \dots, M, \quad (25)$$

$$i = 1, \dots, R, \quad (26)$$

где обозначения векторов и переменных те же, что и в выражениях (1 – 17).

Таким образом, в результате успешного решения оптимизационной задачи на третьем этапе идентификации определяются окончательные значения настраиваемых коэффициентов математической модели ТЭУ и значения не измеряемых режимных параметров, характеризующих соответствующие режимы работы исследуемой установки. После завершения идентификации значения настраиваемых коэффициентов математической модели фиксируются и не подлежат дальнейшим изменениям, а математическая модель считается настроенной с учетом текущего состояния исследуемой установки. Следует подчеркнуть, что все этапы идентификации решаются строго последовательно и учитывают изменения в математической модели, внесенные на предыдущих этапах. Подобную настройку математической модели ТЭУ необходимо выполнять после плановых и аварийных ремонтов исследуемой установки, а также, когда спустя некоторое время расхождение между расчетами контрольных параметров на модели и их замерами на установке станет больше пяти среднеквадратичных отклонений ( $5\sigma$ ).

Метод учета влияния изменения режима работы ТЭУ на эффективность работы входящих в ее состав элементов. Известно, что внутренний относительный КПД отсеков турбины не является постоянной величиной, а меняет свое значение в зависимости от нагрузки турбины. Так, в режимах работы близким к номинальным он будет выше, чем в

режимах с более низкой нагрузкой. Таким образом, при идентификации математических моделей отсеков турбины, а также некоторых других элементов ТЭУ важной является задача учета влияния режима работы на изменение эффективности элементов расчетной схемы исследуемого оборудования.

Вместо настройки постоянных внутренних относительных коэффициентов эффективности каждого из отсеков турбины, в данной работе предлагается использовать модернизированную математическую модель данного элемента схемы энергоблока. С целью учета влияния изменения режима работы на эффективность выработки механической мощности отсеком турбоустановки используются квадратичные функции, в которых в качестве переменной выступает отношение фактического расхода пара через отсек ( $G$ ) к номинальному расходу ( $G^*$ ).

$$\eta_i = A \cdot \left( \frac{G}{G^*} \right)^2 + B \cdot \left( \frac{G}{G^*} \right) + C. \quad (27)$$

Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  уравнения (27) являются общими для каждого из цилиндров турбины (высокого давления, среднего давления и низкого давления), но отношения расходов пара ( $G/G^*$ ) определяются для каждого отсека в зависимости от нагрузки турбины в разных режимах работы установки.

Подобный подход можно использовать при моделировании не только отсеков паровой турбины, но и других элементов ТЭУ, где наблюдается влияние изменяющегося режима работы на его эффективность. Таким образом, данный метод позволяет учесть влияние изменения режима работы исследуемой теплоэнергетической установки на коэффициенты эффективности в моделях элементов данной установки и повысить точность идентификации параметров математической модели ТЭУ.

Оценка точности выполненной идентификации параметров математических моделей теплоэнергетических установок. Как было сказано выше, в предлагаемой методике идентификации используется так называемое правило "трех сигм". Если все «плохие» замеры были выявлены и исключены, то рассчитанные значения контрольного параметра от его замера не должно превышать  $3\sigma$  в большую или меньшую сторону. Все дополнительные отклонения можно связать с погрешностью математической модели исследуемой теплоэнергетической установки.

Суть данного подхода к оценке можно проиллюстрировать на примере замера некоторого контрольного параметра, который изображен на Рисунке 1. Имеется замеренное значение параметра  $P^{зам}$ . Истинное значение данного параметра неизвестно, но, зная класс точности и шкалу датчика, использованного для получения этого замера, можно вычислить среднеквадратичное отклонение данного замера  $\sigma$ , которое будет указывать на диапазон, в котором должно находиться истинное значение измеряемого параметра. Границы диапазона истинного значения параметра могут быть определены следующим образом:

$$P_{\min}^{ист} = P^{зам} - 3\sigma, \quad (28)$$

$$P_{\max}^{ист} = P^{зам} + 3\sigma, \quad (29)$$

$$\sigma = (S \cdot \alpha) / 3, \quad (30)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение замера, зависящее от шкалы датчика  $S$  и его класса точности  $\alpha$ ;  $P_{\min}^{ист}$  – нижняя граница диапазона истинного значения параметра;  $P_{\max}^{ист}$  – верхняя граница диапазона истинного значения параметра.

На Рисунке 1 отмечены четыре рассчитанных на математической модели значения некоторого измеряемого параметра. Зная диапазон, в котором находится истинное значение параметра, можно оценить погрешность используемой математической модели. Из рисунка следует, что два рассчитанных значения параметра находятся за пределами диапазона его истинного значения, а именно значения  $P_1^{расч}$  и  $P_2^{расч}$ .

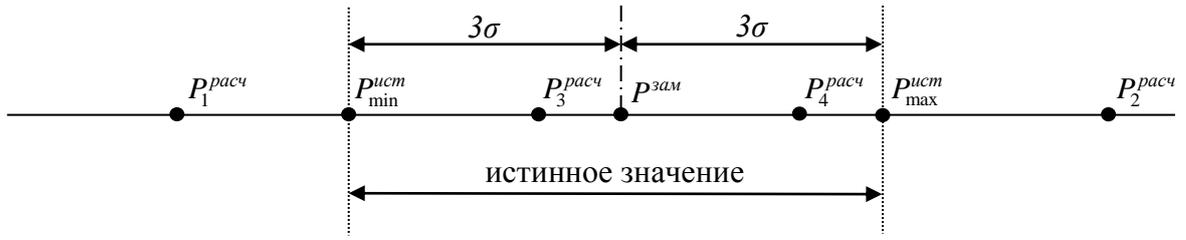


Рисунок 1 – Пример оценки погрешности измеряемого параметра

Невозможно сказать точно, какую долю в общую погрешность расчета привносит несовершенство математической модели ТЭУ, но можно оценить минимальную и максимальную погрешность модерирования, исходя из вышеописанного подхода. Возьмем, к примеру, рассчитанное значение параметра  $P_1^{расч}$ . В данном конкретном примере  $P^{зам} > P_1^{расч}$ , следовательно минимальная и максимальная погрешность модели может быть оценена по следующим формулам.

$$\delta_{\min}^{mod} = P_{\min}^{ист} - P_1^{расч}, \quad (31)$$

$$\delta_{\max}^{mod} = P_{\max}^{ист} - P_1^{расч}, \quad (32)$$

где  $\delta_{\min}^{mod}$  – минимальное значение погрешности математической модели;  $\delta_{\max}^{mod}$  – максимальное значение погрешности математической модели.

С другой стороны, два рассчитанных значения параметра входят в диапазон его истинного значения  $P_3^{расч}$  и  $P_4^{расч}$ . Оба этих рассчитанных значения удовлетворяют требованиям точности и их невязки можно объяснить несовершенством датчика, используемого для получения данного замера. Также видно, что относительная невязка параметра  $P_3^{расч} < P_4^{расч}$ , так как значение  $P_3^{расч}$  находится ближе к замеру данного параметра.

Конечно, даже в случае, когда рассчитанное значение параметра находится внутри диапазона его истинного значения, имеет место как погрешность датчика, так и погрешность моделирования. Однако, представляется затруднительным оценить долю погрешности математической модели в этом случае. Предлагается считать, что относительная невязка данного параметра возникла в результате несовершенства датчика, используемого для получения соответствующего замера. С другой стороны, можно считать, что замер был выполнен достаточно точно и невязка возникает из-за несовершенства математической модели исследуемой теплоэнергетической установки.

Очевидно, при идентификации параметров каждой математической модели, построенной для действующих агрегатов ТЭС, необходимо удостовериться в достаточной точности настройки математической модели исследуемой установки с учетом ее текущего состояния. В качестве критериев точности сходимости отдельных параметров предлагается использовать модули относительных невязок измеряемых параметров. В свою очередь, общую точность решения задачи идентификации параметров математической модели ТЭУ можно относительно оценить, вычислив сумму модулей или сумму квадратов всех относительных невязок контрольных параметров во всех рассматриваемых режимах ТЭУ:

$$k_{xj}^i = \left| \frac{x_{xj}^i - \overline{x_{xj}^i}}{\sigma_{xj}} \right|, \quad (33)$$

$$k_{yk}^i = \left| \frac{y_{yk}^i - \overline{y_{yk}^i}}{\sigma_{yk}} \right|. \quad (34)$$

$$k_{mod} = \sum_{i=1}^R \left[ \sum_{j=1}^N \frac{\left| x_{xj}^i - \overline{x_{xj}^i} \right|}{\sigma_{xj}} + \sum_{k=1}^M \frac{\left| y_{yk}^i - \overline{y_{yk}^i} \right|}{\sigma_{yk}} \right], \quad (35)$$

$$k_{sqr} = \sum_{i=1}^R \left[ \sum_{j=1}^N \frac{(x_{zj}^i - \bar{x}_{zj}^i)^2}{\sigma_{xj}^2} + \sum_{k=1}^M \frac{(y_{zk}^i - \bar{y}_{zk}^i)^2}{\sigma_{yk}^2} \right], \quad (36)$$

где обозначения векторов и переменных те же, что и в выражениях (1 – 17);  $k_{xj}^i$ ,  $k_{yk}^i$  – критерии точности отдельных замеряемых параметров  $x_{zj}^i$  и  $y_{zk}^i$  соответственно;  $k_{mod}$  – сумма модулей относительных невязок во всех рассматриваемых режимах работы;  $k_{sqr}$  – сумма квадратов относительных невязок во всех рассматриваемых режимах работы.

Приведенные критерии точности (35, 36) позволяют оценить увеличение точности настройки математической модели, ставшее доступной благодаря предлагаемой трехэтапной методике идентификации. Например, вычислив значение критериев после второго и третьего этапов идентификации, можно увидеть на сколько процентов снизилась суммарная относительная невязка параметров благодаря минимизации целевой функции, выполненной на третьем этапе. Более того, можно выполнить расчеты третьего этапа идентификации с помощью разных постановок оптимизационных задач с одной начальной точки, что позволит сравнительно оценить эффективность каждой из них.

**Во второй главе** приводится описание технологических схем котельного агрегата и турбоустановки, входящих в состав угольного энергоблока, используемого для построения его подробной математической модели. В качестве прототипа для моделирования был выбран современный энергоблок, установленный на Харанорской ГРЭС (п. Ясногорск, Забайкальский край). В его состав входит паровая турбоустановка К-225-12,8-3Р мощностью 225 МВт и котельный агрегат высокого давления ЕП-630-13,8-565 БТ (ТПЕ-216М) с промежуточным перегревом пара паропроизводительностью 630 т/ч. Математическая модель энергоблока была построена непосредственно автором с применением ПВК СМПП-ПК. Расчетная схема энергоблока состоит из 100 элементов и 169 связей между ними. Полученная математическая модель содержит 1017 информационно-входных, 1455 информационно-выходных параметров, из которых 186 параметров являются итерационно-вычисляемыми и требуют задания начального приближения.

Следует отметить, что данный энергоблок не относится к типовому оборудованию электростанций и его подробная математическая модель построена впервые. Математическая модель энергоблока позволяет выполнять оптимизационные расчеты больших размерностей (сотни оптимизируемых параметров, тысячи ограничений-равенств и ограничений-неравенств) с высокой точностью с помощью модифицированного градиентного метода, разработанного в ИСЭМ СО РАН. Необходимо подчеркнуть, что разработанная математическая модель энергоблока после расчета ее параметров позволяет получить значения любого вычисляемого параметра в каждом из элементов расчетной схемы установки, многие из которых не замеряются на реальной установке и могут использоваться для повышения эффективности эксплуатации ТЭУ и модернизации ее схемы.

Кроме того, в данной главе приводится описание математической модели теплового и гидравлического расчета конденсатора турбоустановки, основанной на конструктивном расчете конденсатора и подробном расчете происходящего в нем теплообмена между паровоздушной смесью и охлаждающей циркуляционной водой через металл трубной доски. Данная модель конденсационной установки позволяет более точно и корректно моделировать процессы конденсирования паровоздушной смеси и передачи теплоты охлаждающей циркуляционной воде и лишена недостатков упрощенной методики расчета конденсатора, разработанной в ВТИ и используемой в ИСЭМ СО РАН ранее.

**В третьей главе** приводится описание и структура программно-вычислительного комплекса, предназначенного для математического моделирования, идентификации параметров моделей ТЭУ и оптимизационных исследований теплоэнергетических установок электростанций. Программно-вычислительный комплекс включает в себя восемь блоков,

соединенных каналами передачи информации. Принципиальная структура ПВК представлена на Рисунке 2. В прямоугольных элементах находятся основные блоки программно-вычислительного комплекса, а в цилиндрических – необходимая для выполнения расчетов исходная информация.

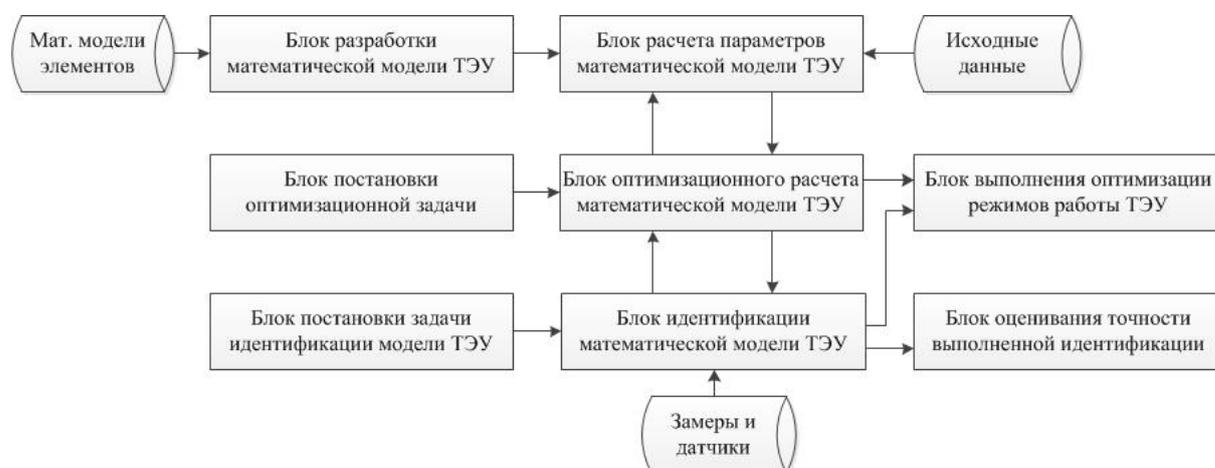


Рисунок 2 – Структура разработанного программно-вычислительного комплекса

На данном этапе программно-вычислительный комплекс не имеет общего графического интерфейса. Блоки реализуются в различных программных средах, а необходимая расчетная информация передается между ними. Блоки разработки математической модели, постановки оптимизационной задачи и постановки задачи идентификации выполняются в программной среде СМПП-ПК. Блок оценивания точности выполненной идентификации выполняется с применением электронных таблиц Microsoft Excel. Остальные блоки ПВК реализуются в среде разработки Microsoft Visual Studio, где происходит компиляция (сборка проекта) в исполняемый файл и запуск оптимизационных расчетов.

При создании ПВК автор использовал разработанные ранее в ИСЭМ СО РАН средства математического моделирования и оптимизации теплоэнергетических установок, а именно СМПП-ПК и модифицированный градиентный метод оптимизации. Но впервые собраны воедино уже существующие и разработанные лично автором блоки в оригинальный ПВК с новой структурой. Разработанный в рамках данной работы ПВК позволяет в одном цикле оптимизационных расчетов решить комплексную задачу идентификации параметров, оценивания состояния и оптимизации режимов работы, используя одну математическую модель исследуемой энергоустановки.

**В четвертой главе** представлены результаты оптимизационных расчетов, направленных на идентификацию параметров математической модели энергоблока, с целью настройки модели данной установки по результатам замеров контрольных параметров. Кроме того, представлены примеры выполненной оптимизации реального режима работы энергоблока с помощью настроенной математической модели и примеры оптимизационных исследований исследуемого энергоблока.

Необходимые для идентификации параметров математической модели энергоблока значения контрольных измеряемых параметров в различных точках ее расчетной схемы были взяты из предоставленного инженерным персоналом электростанции выгрузки показаний датчиков. Класс точности использованных средств измерения составляет: для приборов, измеряющих электрическую нагрузку – 0,5%, давление – 1,0%, температуры воды и пара – 2,0%, расхода – 1,5%, температуры газов – 5,0%. Были отобраны три установившихся режима работы энергоблока (нагрузка 227 МВт, минимальная нагрузка 125 МВт и максимальная нагрузка 235 МВт). Каждый из рассматриваемых режимов работы энергоблока включал в себя 60 замеренных значений контрольных параметров в различных точках технологической схемы, из которых 5 измеряемых параметров являются информаци-

онно-входными (задаваемыми) для математической модели ( $x_3$ ) и 55 параметров являются информационно-выходными (вычисляемыми) при расчете математической модели ( $y_3$ ).

На первом этапе идентификации была сформирована оптимизационная задача (1 – 9), в которой количество оптимизируемых параметров для каждого из 3-х рассматриваемых режимов работы составило 17, суммарное количество ограничений-неравенств – 345, суммарное количество ограничений-равенств – 1455. В качестве целевой функции выступал дополнительный оптимизируемый параметр, в оптимальной точке соответствующий максимальной относительной невязке среди всех измеряемых контрольных параметров в каждом из рассматриваемых режимов работы энергоблока по-отдельности.

Расчеты, выполненные для каждого из 3-х рассматриваемых режимов работы по отдельности на первом этапе решения задачи идентификации, выявили ряд замеров контрольных параметров, мешающих снизить значение максимальной относительной невязки. Среди замеров, вызывающих сомнение в своей точности, выделяются значения давлений на входе в некоторые отсеки турбоустановки, расход пара на входе в конденсатор и значение температуры газов за одним из конвективных пароперегревателей котельного агрегата. Замеры давления на входе во 2, 5, 6 отсеки паровой турбины, как показал инженерный анализ, содержали грубые погрешности измерений, поэтому данные замеры были исключены. Также было принято решение исключить из состава измеряемых параметров расход воды на выходе из конденсатора по причине большого расхождения значений данного параметра в двух режимах работы. Замер температуры горячих газов за второй ступенью конвективного пароперегревателя вторичного пара имел большое расхождение во всех режимах работы; этот замер также был исключен. Таким образом вектор измеряемых параметров после первого этапа идентификации был уменьшен на 5 измеряемых контрольных параметров, содержащих грубую погрешность измерения.

На втором этапе идентификации была сформирована оптимизационная задача (10 – 17), в которой количество оптимизируемых параметров для всех рассматриваемых режимов работы совместно составило 103, суммарное количество ограничений-неравенств – 987, суммарное количество ограничений-равенств – 4365. В качестве целевой функции выступал дополнительный оптимизируемый параметр, в оптимальной точке соответствующий максимальной относительной невязке среди всех измеряемых контрольных параметров во всех рассматриваемых режимах работы энергоблока совместно.

Решение оптимизационной задачи на втором этапе идентификации позволили минимизировать целевую функцию до значения 3,104. В данном случае минимальная погрешность математической модели ТЭУ равняется  $\delta_{\min}^{mod} = 0,104$ , в предположении, что истинное значение параметра с максимальной относительной невязкой лежит на нижней границе диапазона его истинного значения. С другой стороны, максимальная погрешность моделирования равняется  $\delta_{\max}^{mod} = 3,104$ , в предположении, что истинное значение параметра с максимальной относительной невязкой лежит на верхней границе диапазона. Величина относительных критериев точности после второго этапа идентификации (35, 36) составила:  $k_{mod} = 231,88$ ;  $k_{sqr} = 506,21$ .

На третьем этапе идентификации количество оптимизируемых параметров составило 102, суммарное количество ограничений-неравенств – 987, суммарное количество ограничений-равенств – 4365. В качестве целевой функции выступала сумма квадратов относительных невязок среди всех параметров во всех рассматриваемых режимах работы исследуемого энергоблока (18). Важно подчеркнуть, что значение максимальной относительной невязки контрольных параметров, полученной на втором этапе идентификации, было зафиксировано на значении 3,20 и исключено из состава оптимизируемых параметров. Данное значение параметра вводится как константа в выражения ограничений-неравенств измеряемых контрольных параметров (13, 14) и служит верхней границей для относительных невязок во всех рассматриваемых режимах работы энергоблока. Данная операция позволяет исключить увеличение максимальной относительной невязки при ре-

шении оптимизационной задачи третьего этапа идентификации параметров математической модели энергоблока.

После минимизации суммы квадратов относительных невязок на третьем этапе идентификации значение критериев точности составило:  $k_{mod} = 189,18$ ;  $k_{sq} = 390,61$ . Таким образом критерий  $k_{mod}$  уменьшился на 18,4%, а критерий  $k_{sq}$  уменьшился на 22,8% по сравнению с минимизацией только максимальной относительной невязки измеряемых параметров, выполняемой на втором этапе идентификации.

Как было отмечено выше, в настоящей работе предлагается новая постановка оптимизационной задачи третьего этапа идентификации (19 – 26). Ее размерность составила: 258 оптимизируемых параметров, 987 ограничений-неравенств, 4365 ограничений-равенств. В качестве целевой функции выступила сумма дополнительных оптимизируемых параметров, в оптимальной точке соответствующая минимальной сумме модулей относительных невязок измеряемых контрольных параметров во всех рассматриваемых режимах работы установки (19). Значение критериев точности после решения данной задачи составило:  $k_{mod} = 159,02$ ;  $k_{sq} = 358,48$ . Таким образом критерий  $k_{mod}$  уменьшился на 31,4%, а критерий  $k_{sq}$  уменьшился на 29,2% по сравнению со значениями, полученными после минимизации только максимальной относительной невязки измеряемых контрольных параметров на втором этапе идентификации.

Вышеизложенные результаты демонстрируют преимущество предложенного автором трехэтапного подхода к настройке коэффициентов математических моделей сложного теплоэнергетического оборудования. Кроме того, благодаря выполненным вычислительным экспериментам можно сравнить эффективность двух постановок оптимизационной задачи для третьего этапа идентификации, решенных с одной начальной точки. Значение обоих критериев точности меньше в случае новой постановки оптимизационной задачи: значение  $k_{mod}$  ниже на 15,9%, а значение  $k_{sq}$  ниже на 8,2%, что свидетельствует о большей эффективности новой постановки оптимизационной задачи и лучшем приближении к оптимуму. Также следует отметить, что оптимизационный процесс быстрее сходится при использовании новой постановки задачи, так как оптимальное значение достигается за меньшее количество итераций.

Математическая модель действующего теплоэнергетического оборудования, настроенная с учетом его текущего состояния, позволяет решать ряд важных эксплуатационных задач. Среди них можно выделить задачи оценивания состояния и оптимизация режимов работы, а также оптимизационные исследования ТЭУ с целью модернизации ее технологической схемы и повышения энергетической и экономической эффективности работы оборудования. Более того, при наличии настроенных математических моделей всего основного оборудования ТЭС появляется возможность решать задачу оптимального распределения тепловой и электрической нагрузки между агрегатами электростанции.

В качестве целевой функции в задаче оптимизации режима работы энергоблока был выбран удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии, который отражает эффективность функционирования исследуемого энергоблока и учитывает расход мощности на привод агрегатов собственных нужд (насосы, дутьевые вентиляторы, дымососы и др.). Оптимизационная задача содержала 10 оптимизируемых режимных параметров, влияя на которые можно добиться снижения целевой функции и повышения эффективности функционирования исследуемого энергоблока. Вектор-функции ограничений-неравенств состоял из 225 физических и режимных ограничений, вектор-функции ограничений-равенств, содержащий 1455 уравнений, состоял из всех уравнений математической модели энергоблока и входящих в ее состав элементов.

В таблице 1 представлены результаты выполненной оптимизации для одного из исследуемых режимов работы энергоблока. В строках 1 – 10 приводится состав и значения оптимизируемых режимных параметров; в строках 11 – 15 приводятся значения режимных ограничений; в строке 16 – значение минимизируемой целевой функции; в строке 17 – значение энергетического КПД, характеризующей эффективность работы энергоблока.

Таблица 1 – Оптимизационный расчет режима работы энергоблока

№	Оптимизируемый параметр (ограничение)	Размерность	Реальный режим	Оптим-й режим
1	Расход натурального топлива	кг/с	35,41	34,52
2	Коэффициент избытка воздуха в топке	–	1,20	1,20
3	Уменьшение энтальпии пара в 1-м впрыске	ккал/кг	36,34	79,09
4	Уменьшение энтальпии пара в 2-м впрыске	ккал/кг	23,19	0,051
5	Уменьшение энтальпии пара в 3-м впрыске,	ккал/кг	21,51	0,005
6	Уменьшение энтальпии пара во впрыске НД	ккал/кг	152,93	104,95
7	Напор питательного насоса	кгс/см <sup>2</sup>	167,37	161,97
8	Напор насоса охлаждающей воды	кгс/см <sup>2</sup>	2,53	2,53
9	Гидравлическое сопротивление регулирующей задвижки вторичного пара	кгс/см <sup>2</sup>	0,553	0,204
10	Расход охлаждающей воды в конденсатор	кг/с	10210,4	9984,6
11	Вырабатываемая электрическая мощность	МВт	227,1	227,0
12	Температура первичного пара перед турбиной	°С	566,1	570,0
13	Температура вторичного пара перед турбиной	°С	573,7	570,0
14	Температура уходящих газов за котлом	°С	151,1	151,9
15	Давление пара в конденсаторе	кгс/см <sup>2</sup>	0,0653	0,0653
16	Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии	г у.т./кВт·ч	341,94	331,99
17	Энергетический КПД энергоблока	–	35,93	37,01

В рассматриваемом режиме работы энергоблока (227 МВт) удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии снизился на 2,9%. Из этих расчетов следует, что, влияя на режимные параметры энергоблока, можно добиться заметного снижения количества топлива, сжигаемого в котельном агрегате, при той же выработке электроэнергии, что повышает эффективность работы данного энергоблока.

Помимо решения задач оптимизации режимов работы действующей теплоэнергетической установки, настроенная математическая модель ТЭУ позволяет проводить оптимизационные исследования такой установки. Известно, что натурные экспериментальные испытания, проводимые на основном оборудовании тепловых электрических станций, при всех своих достоинствах обладают рядом существенных недостатков. Так, испытания теплоэнергетических установок стоят существенных материальных средств, потраченных на проведение эксперимента и требуют перевода ТЭУ в специальные режимы работы. Более того, полученные опытные данные зачастую недостаточно полно описывают результаты опытов, проведенных на установке, и содержат не все необходимые данные, особенно касательно процессов, проходящих в элементах исследуемой установки. Напротив, применение математического моделирования и аппарата оптимизационных вычислений при исследовании процессов, происходящих в рассматриваемом оборудовании, позволяет с небольшими материальными затратами получить подробную информацию, не вмешиваясь в режим работы энергоустановки.

В следующем исследовании настроенная математическая модель энергоблока используется для определения оптимального значения давления пара в конденсаторе турбоустановки с учетом потерь мощности на привод насоса охлаждающей циркуляционной воды. Для получения значения оптимального давления пара в конденсаторе турбоустановки необходимо выполнить ряд оптимизационных расчетов на настроенной математической модели энергоблока. Суть исследования можно изложить следующим образом. Предлагается с определенным шагом изменять значение количества охлаждающей воды, поступающей в конденсатор. При этом значение давления в конденсаторе будет изменяться пропорционально количеству охлаждающей воды. Важно при этом сохранить неизмен-

ные значения режимных параметров: расхода сжигаемого в котле топлива, температуры первичного пара, температуры вторичного пара и ряда других. Таким образом, мы получим различные значения эффективности функционирования энергоблока при различных количествах охлаждающей воды.

На Рисунке 3 изображены графики полученных зависимостей давления в конденсаторе турбины (сплошная линия) и полезной мощности турбоустановки (штриховая линия) от количества охлаждающей циркуляционной воды. Как видно, график зависимости полезной мощности турбины от расхода охлаждающей циркуляционной воды содержит экстремум, соответствующий оптимальному значению количества охлаждающей воды в исследуемом режиме работы установки. Сопоставив данные из двух графиков, можно получить значение оптимального давления в конденсаторе турбины и расхода охлаждающей циркуляционной воды для данного режима работы установки.

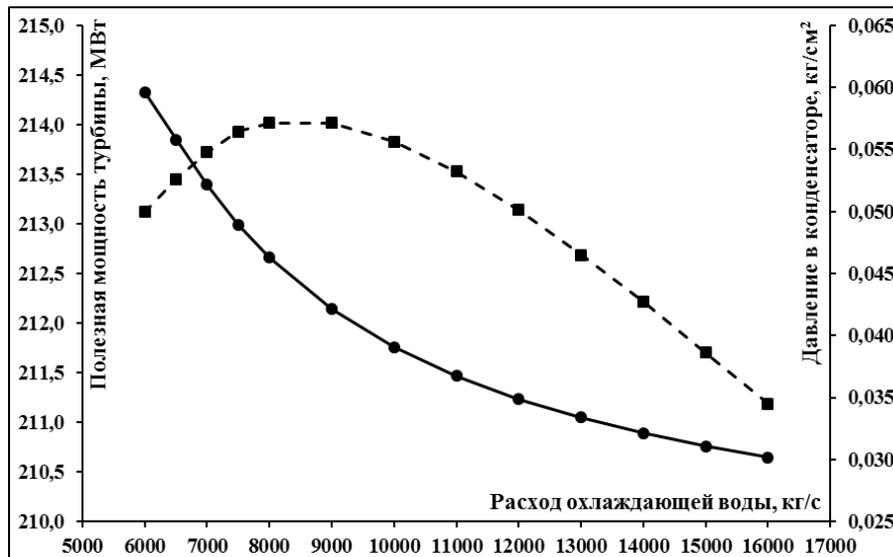


Рисунок 3 – Зависимость полезной мощности турбины и давления пара в конденсаторе от расхода охлаждающей циркуляционной воды

Другим примером применения настроенной математической модели исследуемого энергоблока является исследование влияния впрыска охлаждающей воды в пароохладитель пара промежуточного перегрева на эффективность всего энергоблока. Очевидно, что при нулевом значении впрыска воды в пароохладитель вторичного пара эффективность работы энергоблока будет максимальной, но в реальных режимах его функционирования необходимо жертвовать эффективностью для поддержания необходимой температуры вторичного пара перед турбиной. Таким образом, задача состоит в построении зависимости показателей эффективности энергоблока от количества охлаждающей воды, поступающей в пароохладитель вторичного пара.

Принцип оптимизационного исследования подобен предыдущему. Предлагается с определенным шагом изменять значение количества охлаждающей воды, поступающей в пароохладитель (впрыск) вторичного пара (пара промежуточного перегрева). Важно при этом сохранить неизменные значения режимных параметров: давления и температуры первичного и вторичного пара, давления пара в конденсаторе, мощности турбины и ряда других. Таким образом, мы получим различные значения эффективности функционирования энергоблока при различных количествах охлаждающей воды впрыска в паропровод вторичного пара. В качестве целевой функции в данном случае используется удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии.

На рисунке 4 изображены полученные графики зависимостей энергетического КПД энергоблока (сплошная линия) и удельного расхода условного топлива на выработку элек-

троэнергии нетто (штриховая линия) от количества охлаждающей воды впрыска в трубопровод вторичного пара. На рисунке наблюдается уменьшение энергетического КПД и увеличение удельного расхода топлива с возрастанием количества воды впрыска.

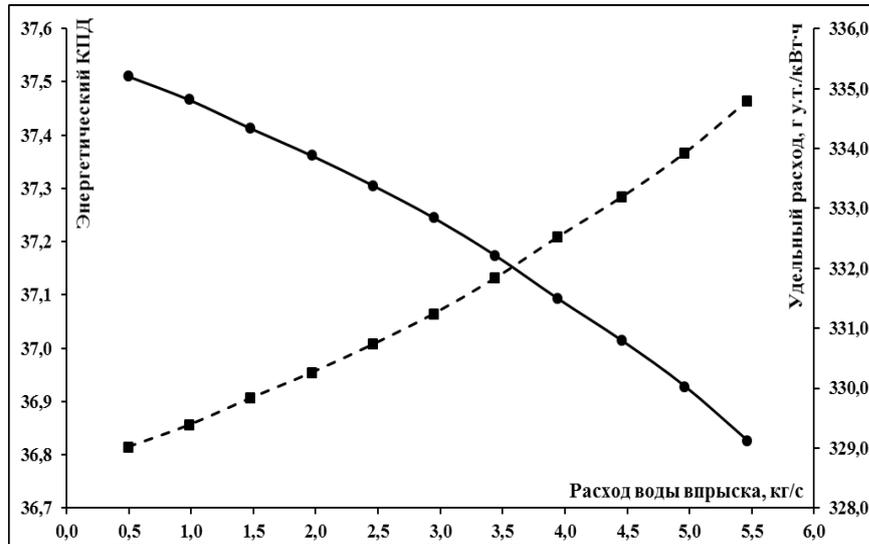


Рисунок 4 – Зависимость энергетического КПД энергоблока и удельного расхода условного топлива от расхода охлаждающей воды впрыска

На Рисунке 5 изображен график полученной зависимости расхода условного топлива при увеличении впрыска в пароохладитель вторичного пара. Как видно из данного графика на каждый дополнительный килограмм охлаждающей воды впрыска в трубопровод вторичного пара приходится увеличение расхода условного топлива в среднем на 0,05 килограмм условного топлива. Причем, с увеличением расхода воды впрыска возрастает и расход топлива, отнесенный к 1 кг воды впрыска.

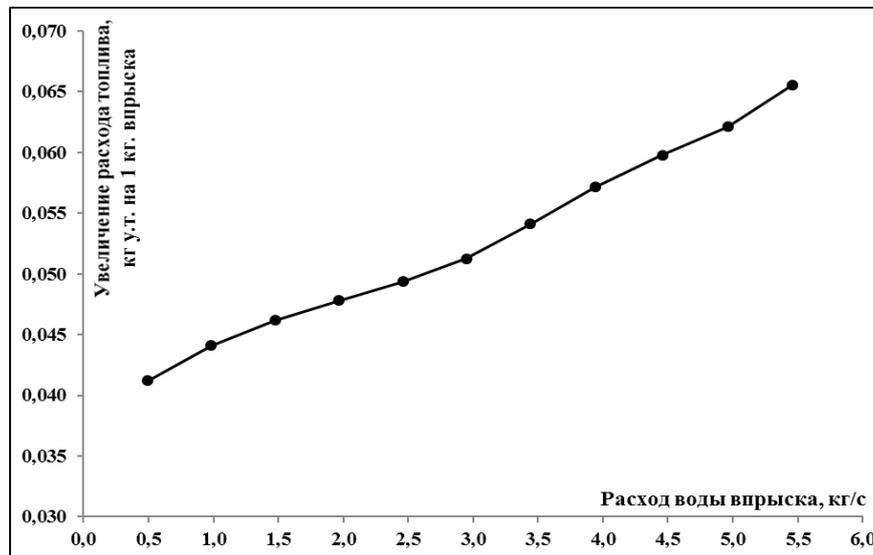


Рисунок 5 – Зависимость расхода условного топлива при увеличении впрыска в пароохладитель вторичного пара

Вышеприведенные примеры оптимизационных исследований энергоблока с применением настроенной математической модели установки демонстрируют возможности математического моделирования действующих ТЭУ и параметрической оптимизации режимов их функционирования.

**В заключении** отражены основные научные результаты работы.

1. Разработана трехэтапная методика идентификации параметров математических моделей действующих теплоэнергетических установок, предназначенная для более эффективной настройки математических моделей ТЭУ и учитывающая особенности технологической схемы исследуемого оборудования. Данная методика позволяет более эффективно выявлять грубые погрешности измерений измеряемых контрольных параметров, полученных при испытании моделируемого оборудования и повысить точность настройки математической модели с учетом текущего состояния энергоустановок.

2. Разработана и апробирована новая постановка оптимизационной задачи для третьего этапа идентификации параметров математических моделей теплоэнергетических установок с оригинальной целевой функцией, в оптимальной точке соответствующей сумме взвешенных наименьших модулей отклонений измеряемых параметров, показавшая ускорение сходимости оптимизационного процесса и повышение точности решения поставленной задачи.

3. Создан и апробирован метод, позволяющий учесть влияние изменения режима работы ТЭУ на изменение коэффициентов эффективности в математических моделях соответствующих элементов расчетной схемы установки, реализованный на примере математической модели отсека турбоустановки.

4. Представлен оригинальный подход, позволяющий оценить суммарную погрешность идентификации математической модели ТЭУ, состоящей как из погрешности датчиков, используемых для получения замеров, так и погрешности самой математической модели исследуемой энергоустановки.

5. Разработаны критерии точности, предназначенные для сравнительной оценки полученных невязок как отдельных измеряемых контрольных параметров, так и суммарной остаточной невязки при решении задачи идентификации параметров математических моделей ТЭУ.

6. Построена подробная математическая модель современного паротурбинного пылеугольного энергоблока, состоящего из барабанного котельного агрегата с промежуточным перегревом пара ЕП-630-13,8-565 БТ паропроизводительностью 630 т/ч и паровой турбоустановки К-225-12,8-3Р номинальной мощностью 225 МВт. Модель энергоблока разработана автором впервые и позволяет выполнять необходимые для идентификации параметров и оценивания состояния режимов оптимизационные расчеты модифицированным градиентным методом.

7. Разработан программно-вычислительный комплекс с оригинальной структурой, который позволяет создавать подробные математические модели ТЭУ с последующим их использованием для совместного решения задач идентификации параметров, оценивания состояния и выполнения оптимизационных расчетов режимов работы ТЭУ.

8. Применительно к исследуемому в работе энергоблоку сформулированы и решены оптимизационные задачи для каждого из трех этапов методики идентификации и приведены значения настраиваемых коэффициентов модели, характеризующие текущее состояние данной ТЭУ, и рассчитанные значения измеряемых параметров с указанием критериев точности для каждого параметра и суммарной относительной точности решения задачи идентификации.

9. Представлены результаты оптимизационных исследований с применением настроенной математической модели энергоблока. Приведены результаты параметрической оптимизации реального режима работы энергоблока (227 МВт) с целью уменьшения удельного расхода условного топлива на выработку электроэнергии за счет оптимального распределения режимных параметров. Приведены результаты оптимизационных расчетов по определению оптимального давления в конденсаторе турбоустановки и результаты исследования влияния впрыска охлаждающей воды в трубопровод вторичного пара на эффективность функционирования энергоблока в целом.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

1. Клер А.М., Алексеюк В.Э. Повышение точности идентификации параметров математических моделей существующего теплоэнергетического оборудования // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 57–76. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-57-76.

2. Клер А.М., Алексеюк В.Э. Эффективная методика настройки математических моделей теплоэнергетического оборудования на его фактическое состояние // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 31. – С. 136–159.

### Статьи в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus

1. Aleksandr Kler, Vitalii Alekseiuk and Aleksei Maksimov. An improved technique for identification of mathematical model parameters of thermal power equipment and assessment of its performance // International Conference of Young Scientists “Energy Systems Research 2019”, E3S Web Conf. – 2019. – Vol. 114. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911406009>.

2. Vitalii Alekseiuk. Improving the Efficiency of the Three-Stage Technique of Mathematical Model Identification of Complex Thermal Power Equipment // ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management, E3S Web Conf. – 2020. – Vol. 209. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903002>.

### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК по прочим специальностям

1. Алексеюк В.Э., Максимов А.С., Сафронов П.Г. Усовершенствованная методика идентификации математических моделей теплоэнергетического оборудования. Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – № 23 (3). – С. 503–515. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-503-515.

### Статьи в прочих изданиях

1. Алексеюк В.Э. Разработка математической модели котлоагрегата ТПЕ-216М с применением метода Ньютона // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» 19–22 апреля 2016. – Иркутск: Изд-во ИрНТУ. – С. 324 – 328.

2. Алексеюк В.Э. Использование модифицированного метода Ньютона при расчете математической модели котельного агрегата ТПЕ-216М // Системные исследования в энергетике. Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН. – 2016. – № 46. – С. 67–72.

3. Алексеюк В.Э., Максимов А.С. Идентификация математической модели конденсационной турбоустановки по результатам испытаний // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» 24–27 апреля 2017. – Иркутск: Изд-во ИрНТУ. – С. 284–288.

4. Алексеюк В.Э. Усовершенствование методики идентификации математических моделей по результатам испытаний на примере конденсационной турбоустановки // Системные исследования в энергетике. Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – 2017. – № 47. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН. – С. 42–55.

5. Alexeyuk V.E. Improvement of the technique of mathematical models identification // Материалы Междисциплинарной научно-практической конференции Иркутского научного центра на английском языке. – Иркутск: Изд-во ИНЦ СО РАН. – 2017. – С. 18–21.

6. Алексеюк В.Э. Решение задач идентификации, оценивания состояния и оптимизации математической модели современного энергоблока // Материалы Всероссийской

научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» 24–28 апреля 2018. – Иркутск: Изд-во ИрННТУ. – С. 221–225.

7. Алексеюк В.Э. Усовершенствованная методика идентификации математических моделей теплоэнергетического оборудования // Системные исследования в энергетике. Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН. – 2018. – № 48. – С. 40–50.

8. V.E. Alexeyuk. An improved technique for identification of mathematical models of thermal power equipment // Energy Systems Research. – 2018. – Vol. 1. – No. 3. – P. 53–60. <http://dx.doi.org/10.25729/esr.2018.03.0007>.