

*В. Э. Алексеюк*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация*

<sup>2</sup> *Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

**Аннотация.** Целью работы является разработка программно-вычислительного комплекса, предназначенного для математического моделирования, идентификации параметров и оптимизации режимов работы действующих теплоэнергетических установок. В качестве прототипа был выбран современный энергоблок номинальной мощностью 225 МВт, установленный на Харанорской ГРЭС. Программно-вычислительный комплекс на данном этапе представляет собой среду разработки, состоящую из восьми основных вычислительных блоков, соединенных каналами передачи информации. В статье приводится краткое описание каждого из вычислительных блоков программно-вычислительного комплекса и программных сред, в которых они реализуются. Программно-вычислительный комплекс позволяет разрабатывать математические модели сложных теплоэнергетических установок и решать оптимизационные задачи больших размерностей. Так, программно-вычислительный комплекс предусматривает идентификацию параметров, необходимую для настройки коэффициентов модели с учетом текущего состояния установки прототипа. Кроме того, настроенную математическую модель теплоэнергетической установки можно использовать для параметрической оптимизации реального режима работы энергоустановки, снижающей топливные издержки, или для проведения оптимизационных исследований без задействования реальной установки. Таким образом, представленный в данной работе программно-вычислительный комплекс предлагает эффективный подход к исследованию и оптимизации действующих теплоэнергетических установок с использованием аппарата математического моделирования и схемно-параметрической оптимизации.

**Ключевые слова:** действующие теплоэнергетические установки, математическое моделирование, методика идентификации, оптимизационные исследования, параметрическая оптимизация режима, программно-вычислительный комплекс, расчет параметров, угольный энергоблок, тепловая электростанция.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

*V.E. Alekseiuk*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation*

## **DEVELOPMENT OF SOFTWARE AND COMPUTER COMPLEX FOR MODELING AND OPTIMIZATION OF OPERATING HEAT AND POWER INSTALLATIONS**

**Abstract.** The aim of the work is to develop the software-computer complex designed for mathematical modeling, identification of parameters and optimization of operating modes of existing thermal power plants. A modern power unit with a nominal capacity of 225 MW, installed at the Kharanorskaya GRES, was chosen as a prototype. The software and computing complex at this stage is a development environment consisting of eight main computing units connected by information transmission channels. The article provides a brief description of each of the software-computer complex computing units and the software environments in which they are implemented. The software-computer complex allows developing mathematical models of complex thermal power plants and solving large-scale optimization problems. For example, the software-computer complex provides for the identification of the parameters necessary to adjust the coefficients of the model, taking into account the current state of the prototype installation. In addition, a tuned mathematical model of a thermal power plant can be used for parametric optimization of the real mode of operation of a power plant, which reduces fuel costs, or for optimization without involving a real installation. Thus, the software-computer complex presented in the paper offers an effective approach to the study and optimization of existing thermal power plants using the apparatus of mathematical modeling and circuit-parametric optimization.

**Keywords:** operating thermal power plants, mathematical modeling, identification technique, optimization studies, parametric optimization, software and computer complex, calculation of parameters, coal-fired power unit, thermal power plant.

**Acknowledgement:** The work was carried out within the framework of the draft state task (no. FWEU-2021-0005) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030

**Введение.** Современные теплоэнергетические установки (ТЭУ), такие как угольные энергоблоки и входящие в их состав котельные агрегаты, паровые турбины и вспомогательное оборудование тепловых электрических станций (ТЭС), представляют собой технические системы, обладающие весьма сложными технологическими схемами, разнообразными элементным составом и режимами функционирования. Ввиду этого основными инструментами исследования теплоэнергетического оборудования ТЭС являются методы математического моделирования и схемно-параметрической оптимизации. Однако такой подход еще не получил широкого распространения в связи с рядом трудностей, возникающих при моделировании сложных иерархически организованных теплоэнергетических объектов и систем, при решении проблемы идентификации математических моделей при изменяющемся фактическом состоянии ТЭУ и при постановке оптимизационных задач.

В отделе теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева накоплен богатый опыт исследования сложных теплоэнергетических установок и тепловых электрических станций. Среди ранних работ выделяются труды А.М. Клера и Н.П. Декановой [1, 2], в которых рассматриваются подходы к оптимизации математических моделей ТЭУ при оперативном управлении режимами ТЭЦ. В работе А.В. Михеева предлагается согласованная методика диагностики исследуемого оборудования, основанная на совместном решении экстремальных оптимизационных задач оценивания состояния и идентификации характеристик ТЭУ [3]. Более того, в работе [4] предложен подход к повышению качества исходной информации за счет исключения погрешностей в измеренных параметрах. Исследования А.М. Клера, А.С. Максимова и Е.Л. Степановой [5–8] являются одними из последних работ, посвященных данной тематике. В них рассматривается разработка «высокоскоростных» математических моделей основного оборудования ТЭС, позволяющих выполнять сложные оптимизационные расчеты режимов работы агрегатов ТЭЦ, а также описывается методика настройки математических моделей под реальное состояние исследуемого оборудования. Данная методика позволяет настроить коэффициенты математической модели таким образом, чтобы результаты, получаемые с помощью математической модели, как можно более точно соответствовали фактическому состоянию оборудования, что обеспечивает обоснованность оптимизационных решений.

Среди современных зарубежных работ можно отметить исследование, выполненное в Испании [9]. В данной работе приводится подход, заключающийся в мультимодальной оптимизации (вычисления в различных режимах работы оборудования) как основу для калибровки математической модели. Методика основана на генетическом алгоритме и посвящена настройке динамических нелинейных систем, таких как модели биологического роста и модели эффективного управления для увеличения прибыли. В работе [10] исследуется проблема обнаружения и диагностики неисправностей промышленного оборудования на примере электростанции. Работа [11], выполненная в одном из университетов Пекина, описывает методику оперативного контроля за производительностью паровой турбины, основанную на более точном измерении потоков теплоносителей и разработанном методе согласования полученных данных.

Исследование вышеизложенных методик выявило присущие им недостатки, оказывающие негативное влияние на точность и корректность идентификации параметров математических моделей существующего оборудования на его фактическое состояние. Во-первых, задача идентификации решается успешно, когда среди замеренных параметров отсутствуют грубые ошибки измерения. Но, если среди замеров присутствуют «плохие» с грубыми ошибками измерения в каком-либо из рассматриваемых режимов работы, то данные ошибки перераспределяются между различными замеряемыми параметрами в одном режиме работы и, что важнее, между различными режимами. Такое перераспределение не позволяет однозначно определить ошибочный замер и приводит к неверным решениям. Во-вторых, вышеизложенные методики не учитывают погрешности непосредственно самой математической модели исследуемого оборудования. С другой стороны, математические модели основного теплоэнергетического оборудования ТЭС основаны на нормативных методах расчета и не всегда

описывают реальные процессы с достаточной точностью. Это вносит дополнительные погрешности, которые должны быть учтены при решении задачи идентификации.

В данной статье приводится описание и структура программно-вычислительного комплекса (ПВК), разработанного для математического моделирования, идентификации параметров и оптимизационных исследований теплоэнергетических установок электростанций.

**Описание программно-вычислительного комплекса.** Программно-вычислительный комплекс включает в себя восемь блоков, соединенных каналами передачи информации. Принципиальная структура ПВК представлена на рис. 1. В прямоугольных элементах находятся основные блоки ПВК, а в цилиндрических – необходимая для выполнения расчетов исходная информация.

На данном этапе разработки программно-вычислительный комплекс не имеет общего графического интерфейса. Блоки реализуются в различных программных средах, а необходимая расчетная информация передается между ними. Ниже приводится более подробное описание каждого блока ПВК.

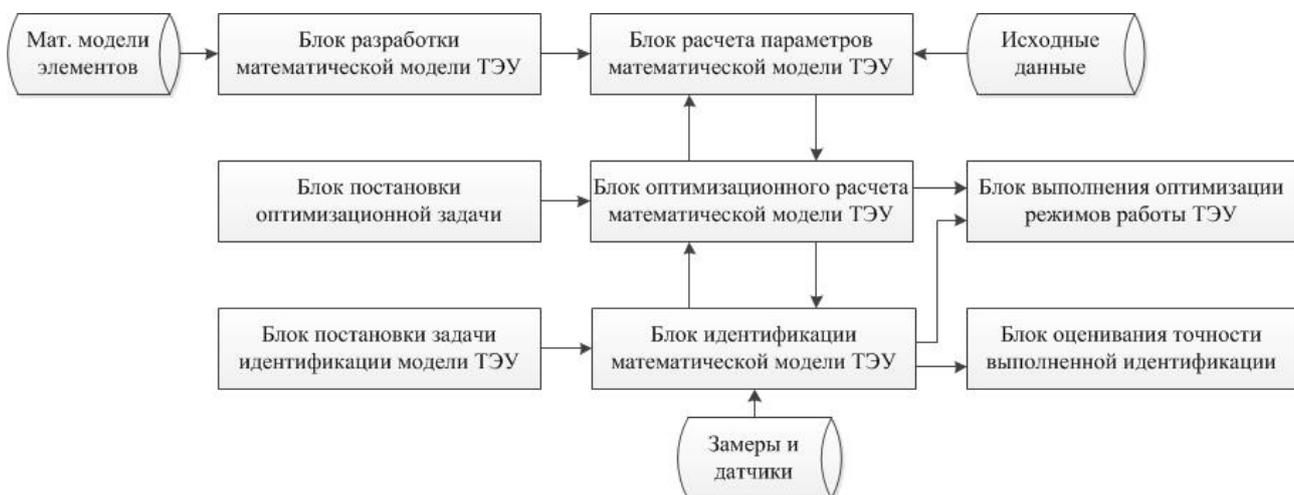


Рис. 1. Структура программно-вычислительного комплекса

**Блок моделирования теплоэнергетической установки.** Реализация данного блока производится в программе для моделирования «Система машинного построения программ» (СМПП), разработанной в ИСЭМ СО РАН [12]. Графический интерфейс программы изображен на рис. 2.

«Система машинного построения программ» позволяет разрабатывать математические модели сложного теплоэнергетического оборудования, состоящего из десятков элементов, соединенных материальными и энергетическими потоками. В составе СМПП имеется архив математических моделей типовых элементов ТЭУ, написанных на языке программирования Fortran с возможностью их редактирования и разработки новых моделей; графический редактор, на рабочем поле которого могут быть размещены элементы расчетной схемы ТЭУ и связи между ними. Также имеется поле для ввода информационно-входных параметров для каждого элемента расчетной схемы и математической модели установки в целом и вывода рассчитанных значений информационно-выходных параметров.

Более того, в структуру СМПП входит планировщик вычислительного процесса, позволяющий на основании построенной в графическом редакторе модели ТЭУ сгенерировать текст программы расчета параметров математической модели ТЭУ, учитывая все взаимосвязи элементов расчетной схемы оборудования и итерационно-вычисляемые параметры математической модели. Текст программы генерируется на языке программирования Fortran, и он является подпрограммой для расчета всех параметров математической модели ТЭУ [13].

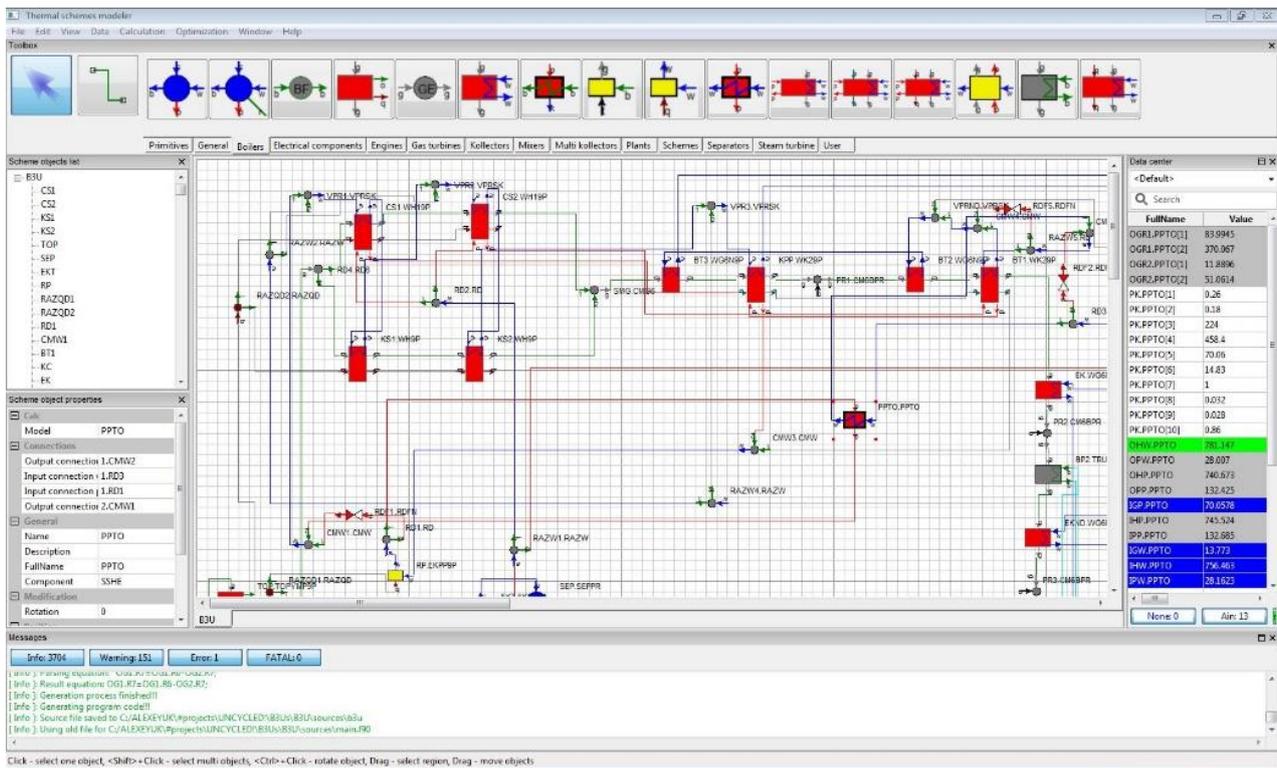


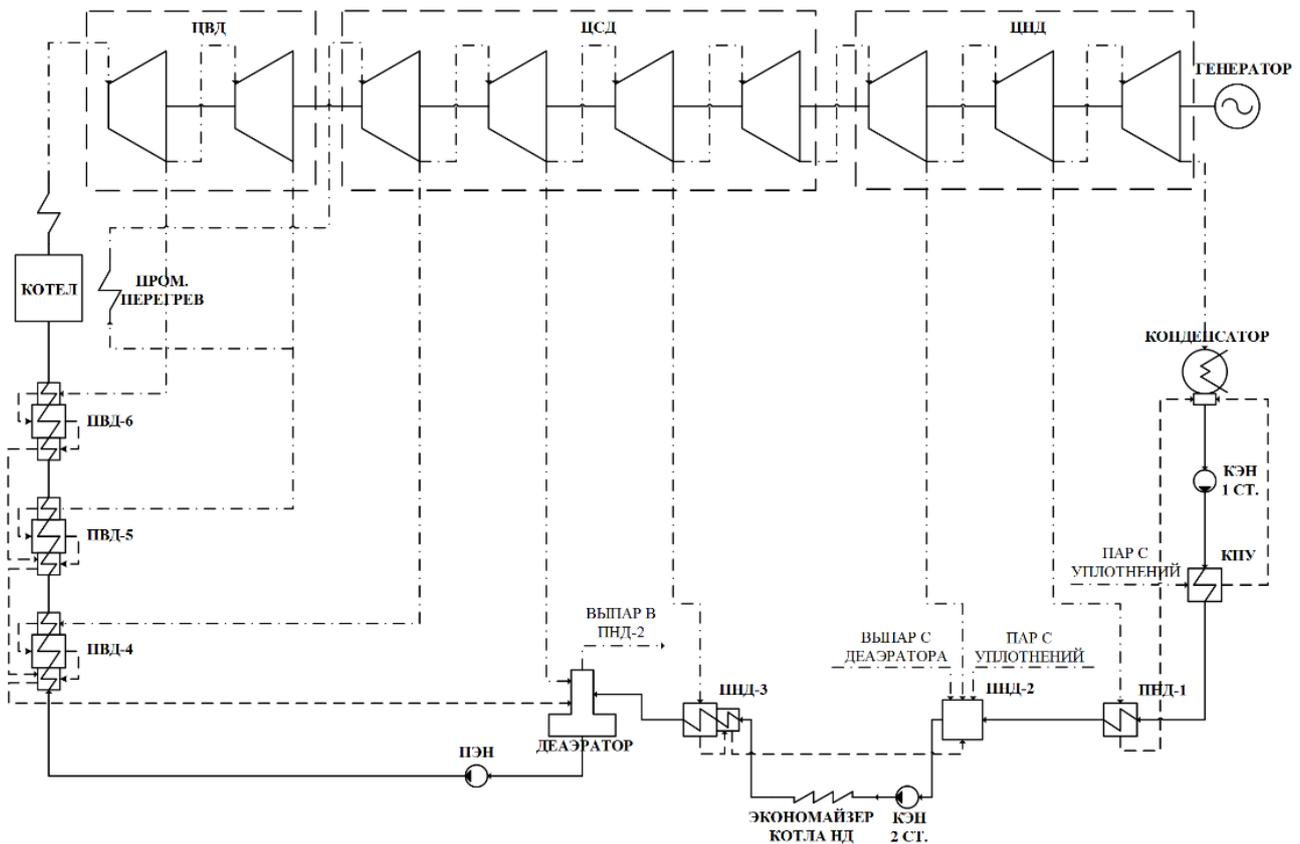
Рис. 2. Графический интерфейс программы СМПП

Используя возможности СМПП, лично автором была разработана подробная математическая модель действующего энергоблока электростанции. В качестве прототипа 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. Расчётная схема энергоустановки представлена на рис. 3.

**Блок расчета параметров математической модели теплоэнергетической установки.** Чтобы получить программу расчета параметров математической модели ТЭУ, недостаточно лишь сгенерировать текст расчетной программы, используя СМПП. Необходимо дополнить проект подпрограммами расчета элементов расчетной схемы ТЭУ, а именно подпрограммы: расчет свойств воды и водяного пара, расчет конвективной (радиационной или конвективно-радиационной) поверхности нагрева котельного агрегата, расчет теплообмена в топке котла, расчет отсека турбоустановки, расчет регенеративного подогревателя и ряд других подпрограмм, написанные на языке Fortran. Также необходимо дополнить проект подпрограммами, содержащими алгоритмы расчета итерационно-вычисляемых параметров.

На следующем этапе проект, состоящий из текста программы расчета параметров математической модели ТЭУ, а также подпрограмм расчета элементов расчетной схемы и подпрограммы расчета итерационных параметров, компилируется в исполняемый файл. Компиляция осуществляется в интегрированной среде разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio, с надстройкой Intel Visual Fortran Composer XE. Исполняемый файл имеет расширение \*.exe.

**Блок постановки оптимизационной задачи.** Перед проведением оптимизационного расчета необходимо описать математическую постановку оптимизационной задачи. В данном блоке назначается состав оптимизируемых параметров, определяется состав вектора-функций ограничений-неравенств, выбирается целевая функция и задается точность решения задачи.



**Рис. 3.** Принципиальная расчетная схема энергоблока Харанорской ГРЭС

Обозначения: ЦВД – цилиндр высокого давления; ЦСД – цилиндр среднего давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; ПРОМ. ПЕРЕГРЕВ – промежуточный перегрев пара в котельном агрегате; КЭН – электронасосы основного конденсата; КПУ – конденсатор пара уплотнений; ПНД – подогреватели низкого давления; ПЭН – электронасос питательной воды; ПВД – подогреватели высокого давления.

Состав оптимизируемых параметров, ограничений-неравенств и целевая функция задаются в менеджере оптимизаций, включенный в состав СМПП. В нем же определяются границы оптимизируемых параметров и ограничений-неравенств, которые при необходимости можно скорректировать. После завершения формирования оптимизационной задачи, ее можно экспортировать в файл на языке Fortran и использовать для компиляции исполняемого файла.

**Блок оптимизационного расчета математической модели теплоэнергетической установки.** В рамках этого блока производится оптимизационный расчет сформированной в предыдущем блоке постановки оптимизационной задачи. Задача идентификации математической модели ТЭУ или оптимизации режима работы ТЭУ относится к классу задач нелинейного программирования. Практически единственным эффективным инструментом решения таких оптимизационных задач, применительно к ТЭУ, являются градиентные методы нелинейной оптимизации. В ИСЭМ СО РАН в течении длительного времени проводилась разработка таких методов с их применением для задач оптимизации параметров различных энергетических установок. Следует отметить, что автором была использована недавно разработанная в ИСЭМ СО РАН модификация градиентного метода решения задач нелинейного программирования, описанная в работе [14].

Суть этого метода можно изложить следующим образом. Предлагается организовать процесс оптимизации таким образом, чтобы решение системы уравнений с требуемой точностью достигалось не во всех точках итерационного процесса, а лишь в конечной точке. При этом процесс оптимизации совмещается с процессом решения систем нелинейных уравнений. Возможные варианты применения такого метода оптимизации были рассмотрены в работах. Преимущества данной модификации очевидны. Во-первых, в таком случае нет необ-

ходимости каждый раз при обращении к расчету параметров математической модели ТЭУ многократно решать нелинейные системы уравнений большой размерности, что значительно увеличивает скорость оптимизационного расчета. Во-вторых, модифицированный градиентный метод оптимизации лишен существенного недостатка классического метода, который заключается в следующем. При расчете частных производных целевой функции и ограничений-неравенств конечно-разностным методом образуются дополнительные погрешности вычислений, которые могут оказывать негативное влияние на точность решения итоговой задачи и даже приводить к неверным результатам.

Таким образом, в данном блоке программно-вычислительного комплекса, производится оптимизация целевой функции с помощью модифицированного градиентного метода расчета, обладающего лучшей сходимостью и большей точностью приближения к оптимуму по сравнению с традиционным оптимизационным подходом, когда на каждой итерации многократно решаются системы нелинейных уравнений математической модели ТЭУ.

**Блок постановки задачи идентификации параметров математической модели теплоэнергетической установки.** В этом блоке ПВК происходит формирование оптимизационной задачи для каждого из этапов идентификации параметров математической модели теплоэнергетической установки.

В настоящей работе для настройки коэффициентов математической модели исследуемого энергоблока использована разработанная при участии автора трехэтапная методика идентификации параметров математических моделей теплоэнергетических установок. Данная методика позволяет более эффективно выявлять и исключать из расчета замеры контрольных 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 [15, 16].

Методика идентификации предполагает исключение на первом этапе расчетов «плохих» замеров контрольных параметров, погрешности которых выходят далеко за рамки класса точности используемых средств измерений. Далее, на втором этапе идентификации минимизируется максимальная относительная невязка между замеряемыми на установке параметрами и параметрами, полученными при расчете математической модели энергоблока. На заключительном третьем этапе идентификации используется оригинальная постановка оптимизационной задачи, основанная на методе взвешенных наименьших модулей [17]. В оптимальной точке решения задачи целевая функция равняется минимальной сумме модулей всех относительных невязок замеряемых параметров, что обеспечивает достижение наилучшей точности сходимости расчетов разработанной математической модели с текущими режимами работы действующей установки.

**Блок идентификации параметров математической модели теплоэнергетической установки.** Этот блок реализует, рассмотренную выше трехэтапную методику идентификации параметров математических моделей теплоэнергетического оборудования. При этом в качестве исходных данных используются значения замеряемых контрольных параметров, полученные при испытании исследуемого оборудования в нескольких режимах работы. В свою очередь расчетные значения замеряемых контрольных параметров определяются в процессе обращения к Блоку расчета параметров математической модели ТЭУ при минимизации целевой функции. Кроме того, необходимо получить значения класса точности и величины шкалы используемых при снятии показаний датчиков, которые применяются для получения среднеквадратичных отклонений и дисперсий замеряемых параметров.

**Блок оценивания точности выполненной идентификации параметров математической модели теплоэнергетической установки.** После завершения расчетов для идентификации параметров математической модели ТЭУ в данном блоке осуществляется анализ и

обработка полученных результатов. Также реализуется расчет коэффициентов точности выполненной идентификации, показывающий достигнутую степень сходимости расчетов математической модели с замерами, выполненными на реальном оборудовании.

Программная среда моделирования СМПП, кроме всего прочего, позволяет генерировать удобные для анализа отчеты в формате Microsoft Excel. Чтобы получить такой отчет требуется предварительно составить шаблон с указанием переменных математической модели ТЭУ, которые необходимо экспортировать в отчет. При этом есть возможность применять форматирование таблицы или текста и создавать формулы, чтобы улучшить читаемость отчета и упростить процесс анализа полученных результатов. В рамках данного блока вычисляются значения критериев точности как отдельных контрольных замеряемых параметров, так и суммарная точность выполненной идентификации параметров математической модели ТЭУ.

#### **Блок выполнения оптимизации режимов работы теплоэнергетической установки.**

В рамках этого блока производятся оптимизационные расчеты режимов работы исследуемого теплоэнергетического оборудования. При этом используются настроенные на фактическое состояние ТЭУ коэффициенты математической модели установки, полученные при идентификации ее параметров.

**Применение настроенной математической модели энергоблока для оптимизации режимов его функционирования.** 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.

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 действующем оборудовании ТЭС, стоят существенных материальных средств, потраченных на проведение эксперимента и требуют перевода ТЭУ в специальные режимы работы. Напротив, применение данного ПВК позволяет с небольшими материальными затратами получить подробную информацию, не вмешиваясь в режим работы энергоустановки.

**Заключение.** В данной работе было приведено описание основных блоков программно-вычислительного комплекса, предназначенного для математического моделирования, идентификации параметров и оптимизационных исследований теплоэнергетических установок электростанций. Использование современных компьютерных технологий: аппарата математического моделирования и схемно-параметрической оптимизации при исследовании и оптимизации действующих теплоэнергетических установок ТЭС является весьма эффективным. Такой подход достаточно универсален и может применяться при расчетах и исследовании не только теплоэнергетических, но и электроэнергетических, трубопроводных и других технических систем.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Деканова Н.П., Клер А.М. Проблемы оптимизации при исследовании теплоэнергетических установок // Приближенные методы анализа и их приложения. – Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1989. – С. 22-43.

2. Клер А.М., Деканова Н.П., Михеев А.В. Задачи оптимизации при оперативном управлении режимами работы ТЭЦ // Методы оптимизации и их приложения: Тезисы докладов 10-й Байкальской школы семинара. – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1995. – С. 80-84.
3. Михеев А.В. Оценивание состояния и идентификация параметров парового котла ТП-81 (ТЭЦ-9) // Системные исследования в энергетике. Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. Выпуск 29. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 1999. – С. 143-148.
4. Деканова Н.П., Михеев А.В. Обнаружение плохих измерений параметров функционирования ТЭЦ // Методы оптимизации и их приложения. Материалы 11-й Байкальской школы семинара. Иркутск: СЭИ СО РАН, 1998. – С. 79-82.
5. Клер А.М., Максимов А.С., Степанова Е.Л. Методика построения быстродействующих математических моделей турбин для задач оперативной оптимизации режимов работы ТЭЦ // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты: сб. науч. трудов / под ред. акад. РАН Накорякова В.Е. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. - Вып.9 – С.85-99.
6. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. High-speed mathematical models of cogeneration steam turbines: optimization of operation in heat and power plants. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 143–150.
7. Клер А.М., Максимов А.С., Степанова Е.Л., Жарков П.В. Оперативная оценка состояния основного оборудования ТЭС // Электрические станции, 2011. - № 4. – С. 2-6.
8. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Optimizing the Operating Modes of Cogeneration Stations Taking Actual State of Main Equipment into Account. *Thermal Engineering*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 500–505.
9. Manuel Chica, José Barranquero, Tomasz Kajdanowicz. Multimodal optimization: An effective framework for model calibration // *Information Sciences*. – Volume 375, 1 January 2017, Pages 79-97. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.09.048>.
10. Karim Salahshoor, Majid Soleimani Khoshro, Mojtaba Kordestani. Fault detection and diagnosis of an industrial steam turbine using a distributed configuration of adaptive neuro-fuzzy inference systems // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – Volume 19, Issue 5, May 2011, Pages 1280-1293.
11. Xiaolong Jiang, Pei Liu, Zheng Li. Data reconciliation for steam turbine on-line performance monitoring // *Applied Thermal Engineering*. – Volume 70, Issue 1, 5 September 2014, Pages 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.007>.
12. Клер А.М., Деканова Н.П., Тюрина Э.А., Корнеева З.Р. Теплосиловые системы: Оптимизационные исследования. Новосибирск: Изд-во «Наука», 2005. 236 с.
13. Клер А.М., Деканова Н.П., Скрипкин С.К. и др. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями. Новосибирск: Наука, сиб. предприятие РАН, 1997. 120 с.
14. Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods // *Energy*. 2019. Vol. 189. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116230>
15. Alexeyuk V.E. An improved technique for identification of mathematical models of thermal power equipment // *Energy Systems Research*. 2018. Vol. 1. No. 3. P. 53–60. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.03.0007>
16. Клер А. М., Алексеюк В. Э. Повышение точности идентификации параметров математических моделей существующего теплоэнергетического оборудования // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2019. № 3. С. 57–76. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-3-57-76>
17. Alekseiuk V. 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 of Conferences*. 2020. Vol. 209. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903002>

## REFERENCES

1. Dekanova N.P., Kler A.M. Problemy optimizacii pri issledovanii teploenergeticheskikh ustanovok [Optimization problems in the study of thermal power plants]. *Priblizhennyye metody analiza i ih prilozheniya* [Approximate analysis methods and their applications]. Irkutsk: SEI SB AS USSR, 1989, pp. 22–43. (In Russian).
2. Kler A.M., Dekanova N.P., Mikheev A.V. Zadachi optimizacii pri operativnom upravlenii rezhimami raboty teploelektrocentrali [Optimization tasks at dispatching control of CHP operation modes]. *Metody optimizacii i ih prilozheniya: tezisy dokladov 10-j Bajkal'skoj shkoly seminara* [Optimization methods and their uses: Abstracts of the 10th Baikal School Workshop]. Irkutsk, 1995, pp. 80–84. (In Russian).
3. Mikheev A.V. Ocenivanie sostoyaniya i identifikaciya parametrov parovogo kotla TP-81 (TEC-9) [State estimation and parameter identification of the steam boiler TP-81 (CHP-9)]. *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodyh uchenyh ISEM SO RAN* [Systems researches in the energy sector. Works of young scholars of ISEM SB RAS]. Irkutsk, 1999, Issue 29, pp. 143–148. (In Russian).
4. Dekanova N.P., Mikheev A.V. Obnaruzhenie plohih izmerenij parametrov funkcionirovaniya teploelektrocentrali [Detection of bad measurements of CHP operation parameters]. *Metody optimizacii i ih prilozheniya. Materialy 11 Bajkal'skoj shkoly seminara* [Optimization methods and their uses. Materials of 11th Baikal School Workshop]. Irkutsk, 1998, pp. 79–82. (In Russian).
5. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Metodika postroyeniya bystrodeystvuyushchikh matematicheskikh modeley turbin dlya zadach operativnoy optimizatsii rezhimov raboty TEC [The method of constructing high-speed mathematical models of turbines for problems of operational optimization of operating modes of CHP]. *Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Publ.*, 2005, vol. 9, pp. 85–99. (In Russian).
6. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. High-speed mathematical models of cogeneration steam turbines: optimization of operation in heat and power plants. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 143–150.
7. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Operativnaya otsenka sostoyaniya osnovnogo oborudovaniya TES [Operational assessment of the condition of the main equipment of thermal power plants]. *Elektricheskiye stantsii – Power plants*, 2011, vol. 4, pp. 2–6.
8. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Optimizing the Operating Modes of Cogeneration Stations Taking Actual State of Main Equipment into Account. *Thermal Engineering*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 500–505.
9. Manuel Chica, José Barranquero, Tomasz Kajdanowicz. Multimodal optimization: An effective framework for model calibration // *Information Sciences*. – Volume 375, 1 January 2017, Pages 79-97. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.09.048>.
10. Karim Salahshoor, Majid Soleimani Khoshro, Mojtaba Kordestani. Fault detection and diagnosis of an industrial steam turbine using a distributed configuration of adaptive neuro-fuzzy inference systems // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – Volume 19, Issue 5, May 2011, Pages 1280-1293.
11. Xiaolong Jiang, Pei Liu, Zheng Li. Data reconciliation for steam turbine on-line performance monitoring // *Applied Thermal Engineering*. – Volume 70, Issue 1, 5 September 2014, Pages 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.007>.
12. Kler A.M., Dekanova N.P., Tyurina E.A., Korneeva Z.R. Thermal power systems: optimization studies. *Novosibirsk: Nauka*; 2005, 236 p. (In Russ.)
13. Kler A.M., Dekanova N.P., Skripkin S.K. Et al. Mathematical modeling and optimization in the problems of thermal power plant operational control. *Novosibirsk: Nauka, Siberian enterprise RAS*; 1997, 120 p. (In Russ.)
14. Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods // *Energy*. 2019. Vol. 189. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116230>

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

16. Kler A. M., Alekseyuk V. E. Improving the accuracy of identifying mathematical model parameters of the existing thermal power equipment. Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university. 2019;3:57-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-3-57-76>

17. Alekseiuk V. 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 of Conferences. 2020. Vol. 209. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903002>

### **Информация об авторах**

*Алексеюк Виталий Эдуардович*, кандидат технических наук, младший научный сотрудник отдела теплосиловых систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск; доцент кафедры теплоэнергетики, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: alexeyuk.vitaliy@yandex.ru.

### **Authors**

*Alekseiuk Vitalii Eduardovich*, Cand. Sc. (Technology), Junior Researcher, Department of Thermal Power Systems, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk; Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: alexeyuk.vitaliy@yandex.ru.

### **Для цитирования**

Аксенюк В.Э. Разработка программно-вычислительного комплекса для моделирования и оптимизации действующих теплоэнергетических установок // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2022. – №3(15). – С.14-23– DOI: 10.26731/2658-3704.2022.3(15).14-23 – Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/315-2022>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 15.10.2022)

### **For citations**

Alekseiuk V.E. Development of software and computer complex for modeling and optimization of operating heat and power installations // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2022. No. 3(15). P. 14-23. DOI: 10.26731/2658-3704.2022.3(15).14-23 [Accessed 15/10/22]