
На правах рукописи

БОРИСОВ Антон Александрович

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ
ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЕЙ С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ
МЕЖДУ СЕТЕВЫМИ ПОДОГРЕВАТЕЛЯМИ**

Специальность: 05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2011

Работа выполнена на кафедре прикладной математики государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор

Жуков Владимир Павлович

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор

Шувалов Сергей Ильич

кандидат технических наук, доцент

Ильин Евгений Трофимович

Ведущая организация –

**Открытое акционерное общество
«Территориальная генерирующая
компания № 6» (ОАО «ТГК-6»)**

Защита состоится **«20» мая 2011 г. в 11.00** часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» по адресу:
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01.

E-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Автореферат разослан **«19» апреля 2011 г.**

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



А.В. Мошкарин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из важнейших направлений исполнения федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» является внедрение энергосберегающих технологий на тепловых электрических станциях (ТЭС). С момента принятия в 2005 году приказа № 268 Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации интенсивно развиваются такие малозатратные энергосберегающие мероприятия, как разработка и внедрение прикладных программных комплексов по оптимизации распределения тепловых и электрических нагрузок между агрегатами электростанций. Широкому внедрению программных комплексов способствовали также сложившиеся принципиально новые условия работы электростанций, особенно теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), на Новом оптовом рынке электроэнергии и мощности (НОРЭМ).

Решение задачи оптимального распределения тепловых и электрических нагрузок между параллельно работающими агрегатами ТЭЦ традиционно базируется на раздельном расчете показателей работы сетевых подогревателей и собственно турбоагрегатов. Между тем, расчеты показывают, что режим работы сетевых подогревателей, установленных в тепловой схеме соответствующих турбоагрегатов, существенно влияет не только на регулировочный диапазон изменения тепловой и электрической нагрузок турбоагрегата, но и на показатели его тепловой экономичности. Так значения показателей экономичности турбоагрегата типа Т-100/120-12,8 ПО ТМЗ по выработке электроэнергии при одних и тех же нагрузках могут варьироваться в пределах 30 % при измерении давления пара в камере регулируемого теплофикационного отбора, то есть при изменении параметров работы сетевых подогревателей.

Таким образом, разработка адекватных математических моделей систем и подсистем ТЭЦ для оценки влияния потокораспределения воды между сетевыми подогревателями на тепловую экономичность группы турбоагрегатов, разработка алгоритмов оптимизации загрузки оборудования с учетом этого влияния и программная реализация этих алгоритмов являются актуальными задачами, стоящими перед энергетикой.

Актуальность работы подтверждается также ее выполнением в рамках Федеральной целевой программы «Интеграция» (2.1-А118 Математическое моделирование ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий) и международных договоров о научно-техническом сотрудничестве с Ченстоховским политехническим университетом (Польша).

Целью работы является повышение эффективности выработки тепловой и электрической энергии на ТЭЦ путем учета потокораспределения воды между сетевыми подогревателями при оптимальном распределении нагрузок между турбоагрегатами.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

– выбор моделей энергетического оборудования, позволяющих адекватно определять технико-экономические показатели его работы в регулировочных диапазонах изменения режимных параметров;

– разработка алгоритма компьютерного представления математических моделей энергетического оборудования, обеспечивающего возможность использования этих моделей в прикладных программных комплексах по оптимизации распределения нагрузок;

– разработка математических моделей теплофикационных турбоагрегатов с учетом характеристик установленных в их тепловой схеме сетевых подогревателей, оценка влияния сетевых подогревателей на регулировочный диапазон изменения нагрузок и показатели тепловой экономичности турбоагрегата;

– разработка методов, алгоритмов и программных модулей по оптимизации состава работающего турбинного оборудования и нагрузок агрегатов с учетом потокораспределения сетевой воды между подогревателями теплофикационных установок (ТФУ) по условию минимальных расходов топлива;

– внедрение разработанных методов, алгоритмов и программных модулей в производство, выявление величины экономии топлива за счет учета потокораспределения сетевой воды при оптимизации загрузки турбоагрегатов.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности:

в части *формулы специальности* – «...поиск приемов и методов оптимизации расчета, выбора и оптимизации параметров рабочих режимов оборудования...»; в части *области исследования* – пункту 1: «Разработка научных основ методов, показателей качества и режимов работы агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом»; пункту 2: «Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах и общем цикле тепловых электростанций»; пункту 3: «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий производства электрической энергии и тепла, использования топлива, водных и химических режимов, способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду».

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Сформулирована и решена задача структурной и режимной оптимизации турбоагрегатов ТЭЦ с учетом потокораспределения воды через сетевые подогреватели при заданных суточных графиках несения суммарных электрической и тепловой нагрузок.

2. Предложен синтезированный метод численного решения задачи оптимального распределения нагрузок между турбоагрегатами ТЭЦ, сочетающий два метода: метод направленного поиска в многомерных подпространствах параметров тепловых и электрических нагрузок и метод покоординатного поиска между этими подпространствами, учитывающий ограничения по суммарным нагрузкам и ограничения на область допустимых значений режимных параметров каждого агрегата. Разработан алгоритм компьютерной реализации синтезированного метода.

3. Разработан модифицированный метод множителей Лагранжа, учитывающий как ограничения на суммарные нагрузки группы турбоагрегатов, так и технологические ограничения на допустимые диапазоны изменения режимных параметров оборудования, на основании которого получено аналитическое решение задачи оптимального распределения нагрузок между турбоагрегатами.

4. Получены новые данные, доказывающие, что включение в параметры оптимизации расходов воды через сетевые подогреватели индивидуальных ТФУ при оптимизации режима работы турбоагрегатов ТЭЦ обеспечивает получение экономии топлива, сопоставимой с экономией топлива за счет оптимизации без учета режимных параметров работы ТФУ.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработан программный комплекс «ТЭС–Эксперт», защищенный свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, позволяющий производить выбор оптимального состава и режима работы агрегатов ТЭЦ при заданных графиках суммарных электрической и тепловой нагрузок и прогнозировать технико-экономические показатели работы оборудования в расчетных режимах.

2. Выполнен анализ методов компьютерного представления математических моделей оборудования тепловых электростанций в виде энергетических характеристик. Показано, что с точки зрения использования этих моделей в прикладных программных комплексах по оптимизации распределения нагрузок наиболее приемлемым вариантом является использование кубических сплайнов. Разработан автоматизированный программный модуль представления энергетических характеристик оборудования в электронном виде.

3. Программный комплекс «ТЭС–Эксперт» внедрен на Владимирской ТЭЦ-2 ОАО «ТГК-6» и Омской ТЭЦ-5 ОАО «ТГК-11». Реализованные технологические решения по повышению эффективности использования теплофикационных установок, оптимизации состава работающего оборудования и распределения тепловых и электрических нагрузок между агрегатами обеспечили получение годовой экономии тепловой энергии на Владимирской ТЭЦ-2 в количестве 14 000 Гкал (58 615,2 ГДж) и годовой экономии условного топлива на Омской ТЭЦ-5 в количестве 7000 тонн, что подтверждено документами.

4. Разработанные математические модели энергетического оборудования, методы расчета и их программная реализация внедрены в учебный и научно-исследовательский процессы Ченстоховского политехнического университета (Польша) и Ивановского государственного энергетического университета.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием апробированных методов математического моделирования энергетического оборудования и анализа показателей тепловой экономичности его работы, совпадением результатов расчета и фактических показателей работы оборудования в условиях промышленной эксплуатации на двух различных электростанциях, а также совпадением полученных результатов расчетов с опубликованными результатами исследований других авторов.

Автор защищает:

1. Постановку задачи структурной и режимной оптимизации турбоагрегатов ТЭЦ с учетом режима работы и схемы включения подогревателей индивидуальных и стационарных теплофикационных установок при заданных графиках суммарных тепловой и электрической нагрузок.

2. Аналитические решения задач оптимизации распределения нагрузок между турбоагрегатами, полученные с использованием модифицированного

метода неопределенных множителей Лагранжа, позволяющего учитывать как ограничения на суммарную стационарную нагрузку, так и технологические ограничения на допустимые режимы работы оборудования.

3. Синтезированный метод численного решения задачи оптимального распределения нагрузки между турбоагрегатами ТЭЦ, сочетающий два метода: метод направленного поиска в многомерных подпространствах параметров тепловых и электрических нагрузок и метод покоординатного поиска между этими подпространствами, учитывающий ограничения по суммарным нагрузкам и ограничения на область допустимых значений параметров работы каждого агрегата.

4. Алгоритм компьютерной реализации разработанного синтезированного метода численного решения задачи оптимального распределения нагрузки между турбоагрегатами ТЭЦ.

5. Результаты анализа методов компьютерного представления математических моделей оборудования тепловых электростанций с точки зрения возможности использования этих моделей в прикладных программных комплексах по оптимизации распределения нагрузок. Автоматизированный программный модуль для компьютерного представления математических моделей энергетического оборудования в виде энергетических характеристик.

6. Программный комплекс «ТЭС–Эксперт», позволяющий производить выбор оптимального состава и режима работы агрегатов ТЭЦ при заданных графиках суммарных электрической и тепловой нагрузок и прогнозировать технико-экономические показатели работы оборудования в расчетных режимах.

7. Результаты внедрения программного комплекса «ТЭС–Эксперт» на Владимирской ТЭЦ-2 ОАО «ТГК-6» и Омской ТЭЦ-5 ОАО «ТГК-11» и достигнутую экономию тепловой энергии и топлива.

8. Новые данные, характеризующие экономию топлива за счет учета потокораспределения сетевой воды между подогревателями теплофикационных установок при оптимизации режима работы турбоагрегатов ТЭЦ.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены на Владимирской ТЭЦ-2 ОАО «ТГК-6» и Омской ТЭЦ-5 ОАО «ТГК-11», что подтверждено актами внедрения. Разработанные модели, методы и алгоритмы расчета, модули их программной реализации использованы в научно-исследовательском процессе Ченстоховского политехнического университета (Польша), а также внедрены в учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета в рамках лабораторного практикума по курсу «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях».

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке методики и программного модуля, обеспечивающих компьютерное представление моделей энергетического оборудования в виде энергетических характеристик, методики расчета и оптимизации распределения нагрузок между агрегатами ТЭЦ с учетом потокораспределения сетевой воды между подогревателями теплофикационных установок, алгоритмов и программных кодов программного комплекса «ТЭС–Эксперт», в адаптации и внедрении данного про-

граммного комплекса на электростанциях, проведении расчетного анализа эффективности оптимизации.

Апробация работы. Основные результаты работы опубликованы и обсуждались на семи конференциях, в том числе четырех международных: Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития энерготехнологии» XV Бенардосовские чтения (Иваново, 2009 г.); XII и XV Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2006 и 2009 гг.); XXII Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-22» (Псков, 2009 г.); V Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2006 г.); V Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (Иваново, 2010 г.); Региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Теплоэнергетика» (Иваново, 2009 г.).

Публикации. Материалы, изложенные в диссертации, нашли отражение в 23 опубликованных работах, в том числе в 8 ведущих рецензируемых журналах и изданиях (по списку ВАК), одной монографии, 6 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы, включающего 159 наименований, и приложений. Работа изложена на 166 страницах, не считая приложений, содержит 42 рисунка и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, поставлена цель, сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, показана научная новизна и практическая значимость работы, дана общая характеристика структуры диссертации.

В первой главе приведен анализ схем включения энергетического оборудования, используемого для генерации тепловой и электрической энергии на ТЭС, рассмотрены методы их расчета и оптимизации.

Анализ схем с точки зрения энергосбережения показал преимущества совместной выработки тепловой и электрической энергии на ТЭЦ. Анализ подходов к математическому моделированию систем и подсистем ТЭЦ показал перспективность представления моделей в виде энергетических характеристик, которые позволяют синтезировать модели сложных систем из моделей их подсистем. Выполнен анализ критериев эффективности функционирования энергетического оборудования и приведен обзор оптимизационных задач, сформулированных на их основе. Проанализированы существующие методы решения многомерных оптимизационных задач и показаны подходы линейного и нелинейного программирования, используемые при решении задач оптимизации режимов работы ТЭС. Проанализированы существующие подходы к построению компьютерных вычислительных комплексов, предназначенных для анализа эффективности функционирования ТЭС. На основе проведенного анализа уточнены основные задачи исследования.

Во второй главе изложены теоретические положения предложенных методов моделирования и оптимизации структуры и режимов работы турбоагрегатов и систем тепловых электростанций.

Для компьютерного представления математических моделей энергетического оборудования в виде энергетических характеристик проанализированы варианты линейной, квадратичной, кубической, кусочно-кубической аппроксимирующих зависимостей. Для определения наиболее приемлемого вида аппроксимирующей зависимости энергетических характеристик проведены численные эксперименты, результаты которых для турбоагрегата ПТ-65/75-130/13 представлены в табл. 1.

Анализ результатов показал, что наиболее точное описание энергетических характеристик обеспечивается применением для каждого интервала энергетических характеристик кубических сплайнов (кусочно-кубической аппроксимации). При таком представлении максимальная относительная погрешность (R_{\max}) рассчитанных значений (y) по сравнению со значениями энергетических характеристик (y_r) не превышает 0,01 %, что следует признать удовлетворительным результатом.

Таблица 1

Вид аппроксимации	Вид энергетической характеристики для турбоагрегата ПТ-65/75-130/13 ($x_1 = Q_p$, Гкал/ч; $x_2 = Q_t$, Гкал/ч; $x_3 = N$, МВт; $y = Q = qN$, Мкал/ч, $y_1 = q$, ккал/кВт ч)*	Средняя погрешность $R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{y_i - y_{r,i}}{y_i} \right $, %	Максимальная относительная погрешность, R_{\max} , %
Линейная зависимость для всей рабочей области	$y = 21456,20 - 330,36 x_1 - 647,24 x_2 + 1915,54 x_3$	1,2	[-5,0; 7,0]
Квадратичная зависимость для всей рабочей области	$y = 23603,98 - 322,34 x_1 - 695,02 x_2 + 1836,82 x_3 - 0,05 x_1^2 + 0,61 x_2^2 + 0,77 x_3^2$	1,0	[-4,4; 5,4]
Кубическая зависимость для всей рабочей области	$y = 4466,97 - 278,54 x_1 - 627,84 x_2 + 3150,58 x_3 - 0,99 x_1^2 - 1,30 x_2^2 - 27,81 x_3^2 + 0,01 x_1^3 + 0,01 x_2^3 + 0,19 x_3^3$	0,9	[-4,6; 5,7]
Кубическая зависимость для каждой пары Q_p и Q_t	$y_1 = 526,25 + 56,295 x_3 + 1,0089 x_3^2 + 0,0069 x_3^3$ ($Q_p = 0$, $Q_t = 50$ Гкал/ч)	0,00	[-0,05; 0,05]
Кубические сплайны (зависимость для каждого интервала каждой пары Q_p и Q_t)	$y_1 = c_{i1} + (c_{i2} + (c_{i3} + x_3 c_{i4}) x_3) x_3$	0,00	[-0,01; 0,01]

* для решения практических задач использована техническая система единиц.

Полученные математические описания энергетических характеристик оборудования позволяют синтезировать из них модели всей станции и формулировать на их основе задачи оптимального выбора режима и состава работающего оборудования ТЭЦ с учетом режимов работы и структуры ТФУ.

В качестве целевой функции оптимизации выбирается расход тепловой энергии на группу турбоагрегатов, обеспечивающий заданные суммарные тепловую и электрическую нагрузки данной группы турбоагрегатов. В качестве параметров оптимизации выбираются нагрузки отдельных агрегатов. Оптимизационная задача в общем виде формулируется следующим образом: оптимально распределить заданные тепловые (Q_t , Q_p) и электрическую (N) нагрузки между турбоагрегатами с учетом влияния режима работы теплофикационных установок:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n N_i \cdot q_{Ti}(Q_{pi}, Q_{ti}, N_i, p_i) \Rightarrow \min_{Q_{pi}, Q_{ti}, N_i, p_i}, Q_p = \sum_{i=1}^n Q_{pi}; Q_t = \sum_{i=1}^n Q_{ti}; N = \sum_{i=1}^n N_i \quad (1)$$

где Q – суммарный расход тепловой энергии на выработку электроэнергии, N – электрическая мощность турбогенератора; q_T – удельный расход тепловой энергии брутто на выработку электроэнергии турбоагрегатом; Q_t – тепловая нагрузка регулируемого теплофикационного отбора пара; Q_p – тепловая нагрузка регулируемого производственного отбора пара; p – давление пара в камере регулируемого теплофикационного отбора; n – количество турбоагрегатов, участвующих в распределении нагрузки; индекс i – номер агрегата или номер подогревателя.

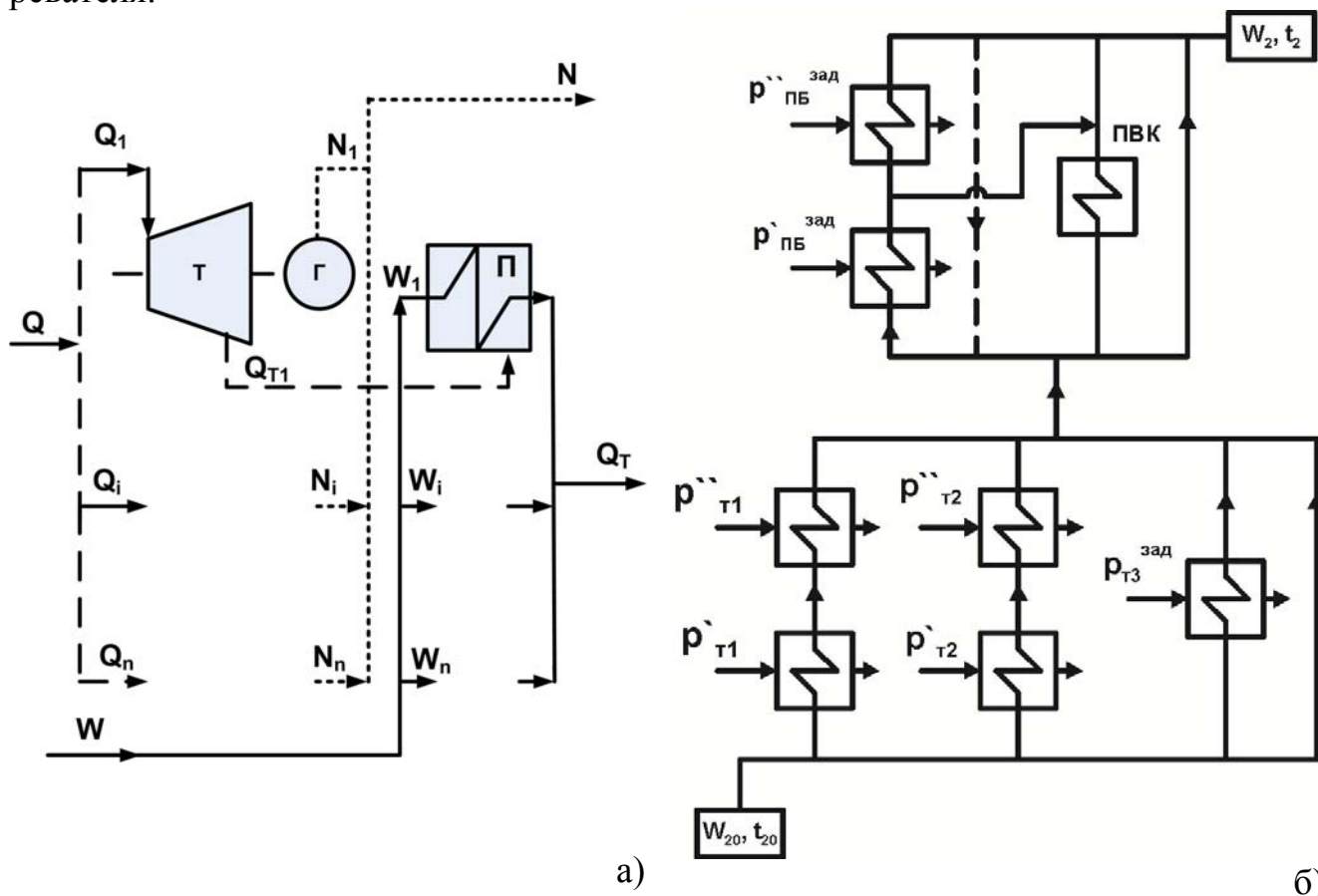


Рис. 1. Схемы теплофикационных установок индивидуального (а) и станционного (б) типа: Т – турбоагрегат, Г – турбогенератор, П – подогреватель сетевой воды, ТФУ – теплофикационная установка; сплошными линиями показаны энергетические потоки с сетевой водой, штриховыми – с паром, пунктирными – с электрической энергией

Отпуск теплоты с ТЭЦ имеет специфические особенности для индивидуальных и стационарных теплофикационных установок (рис. 1). Под индивидуальной ТФУ, схема которой приведена на рис. 1 (а), понимается размещение подогревателей сетевой воды в тепловой схеме конкретного турбоагрегата. Под стационарной ТФУ, пример которой показан на рис. 1 (б), понимается установка сетевых подогревателей без их привязки к конкретным турбоагрегатам по греющему пару. Постановка и решение оптимизационных задач для индивидуальных и стационарных ТФУ имеют особенности и рассматриваются отдельно.

Для индивидуальной ТФУ постановка и решение задачи оптимального распределения нагрузок рассматривается применительно к ТЭЦ, на которой установлены турбоагрегаты типа «Т» с подогревателями сетевой воды горизонтального типа (ПСГ), установленными в тепловой схеме соответствующих турбоагрегатов (рис. 1 (а)). Математическая модель сетевого подогревателя (или всей ТФУ при двухступенчатом подогреве сетевой воды) в виде энергетической характеристики представляется зависимостью расхода сетевой воды (W_i) от тепловой нагрузки сетевого подогревателя (Q_{Ti}) при данном давлении пара в камере регулируемого теплофикационного отбора (p_i) (рис. 2). На рис. 2 область между линиями минимального и максимального значений p_i и W_i показывает диапазон возможного изменения тепловой нагрузки. При заданных значениях тепловой нагрузки (Q_{Ti}) и расхода сетевой воды (W_i) по энергетическим характеристикам определяется давление пара в камере регулируемого теплофикационного отбора турбоагрегата $p_i = f(Q_{Ti}, W_i)$, что позволяет представить энергетическую характеристику собственно турбоагрегата с учетом характеристики сетевого подогревателя в виде зависимости удельного расхода тепловой энергии брутто на выработку электроэнергии от электрической мощности, тепловой нагрузки и расхода сетевой воды:

$$q_{\partial i} = f(Q_{Ti}, N_i, p_i) = f(Q_{Ti}, N_i, p_i(Q_{Ti}, W_i)) = f(Q_{Ti}, N_i, W_i) . \quad (2)$$

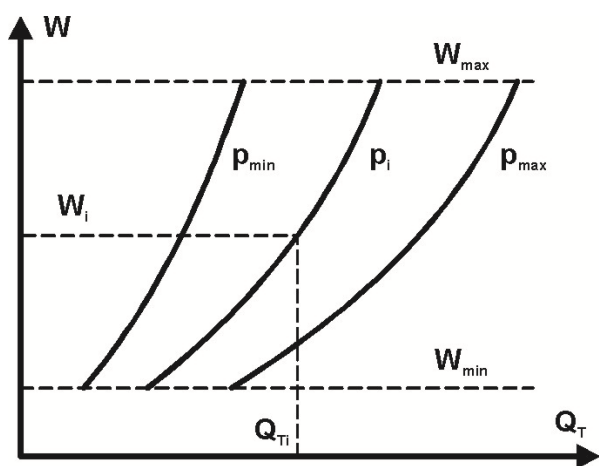


Рис. 2. Зависимость расхода сетевой воды от тепловой нагрузки сетевого подогревателя при различных значениях давления пара в камере регулируемого теплофикационного отбора турбоагрегата

Суммарные значения тепловой и электрической нагрузок и расхода сетевой воды, которые необходимо распределить между агрегатами, считаются заданными и записываются в виде ограничений. Оптимизационная задача (1) с учетом энергетических характеристик (2) и балансовых ограничений записывается в виде:

$$F = \sum_{i=1}^n q_{\partial i}(Q_{Ti}, N_i, W_i) \cdot N_i \rightarrow \min_{Q_T, N, W} , \quad (3)$$

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_{Ti}; W \geq \sum_{i=1}^n W_i; N = \sum_{i=1}^n N_i .$$

Следует дополнительно отметить, что область допустимых нагрузок оборудования определяется технологическими ограничениями и имеет сложную форму, что необходимо учитывать при решении оптимизационной задачи.

Для получения аналитического решения задачи (1) используется метод неопределенных множителей Лагранжа, модифицированный для учета ограничений на область допустимых значений режимных параметров следующим образом. Для учета указанных ограничений вводится специальная матрица \mathbf{K} : если значение параметра находится в допустимом диапазоне, то соответствующий элемент матрицы равен единице, в противном случае элемент равен нулю

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, x_{ij} \in [x_{ij}^{\min}, x_{ij}^{\max}] \\ 0, x_{ij} \notin [x_{ij}^{\min}, x_{ij}^{\max}] \end{cases} \quad (4)$$

Решение задачи (1) с учетом ограничений (4) получается в виде

$$Q_{mi} = k_{1i} \frac{\lambda_1 - c_{2i}}{2c_{5i}}; \quad Q_{pi} = k_{2i} \frac{\lambda_2 - c_{3i}}{2c_{6i}}; \quad N_i = k_{3i} \frac{\lambda_3 - c_{4i}}{2c_{7i}};$$

$$\lambda_1 = \frac{2Q_{pi} + \sum \frac{k_{1i}c_{2i}}{c_{5i}}}{\sum \frac{k_{1i}}{c_{5i}}}; \quad \lambda_2 = \frac{2Q_{ri} + \sum \frac{k_{2i}c_{3i}}{c_{6i}}}{\sum \frac{k_{2i}}{c_{6i}}}; \quad \lambda_3 = \frac{2N_i + \sum \frac{k_{3i}c_{4i}}{c_{7i}}}{\sum \frac{k_{3i}}{c_{7i}}}, \quad (5)$$

где λ – неопределенные множители Лагранжа, c_{ji} – параметры квадратичной аппроксимирующей зависимости (см. табл. 1) для i -го турбоагрегата.

Для задачи (3) предложен комбинированный численный метод решения, сочетающий метод направленного поиска в многомерных подпространствах параметров нагрузок и метод покоординатного поиска между этими подпространствами.

Методы направленного поиска дают возможность быстрого нахождения решения для гладких функций при отсутствии ограничений на параметры системы. Предлагаемая модификация метода градиентного спуска, получившая название метода проекций градиента, позволяет учитывать ограничения по суммарной нагрузке (3).

Пространство искомых параметров разбивается на три подпространства:

$$\mathbf{Q}_T = \{Q_{T1}, Q_{T2}, \dots, Q_{Tn}\}; \quad \mathbf{N} = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}; \quad \mathbf{W} = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}. \quad (6)$$

Каждое из линейных ограничений по суммарной нагрузке (3) может быть представлено уравнением плоскости в соответствующем подпространстве искомых параметров. Каждая точка, принадлежащая этой плоскости, автоматически обеспечивает одно из ограничений (3) в соответствующем подпространстве (6). Метод проекции градиента заключается в определении градиента целевой функции и его проекции на плоскость ограничений в каждом подпространстве. Вектор градиента направлен в сторону наискорейшего изменения целевой функции, а его проекция на плоскость ограничений будет определять направле-

ние наискорейшего изменения целевой функции при одновременном выполнении соответствующих ограничений. Поиск решения осуществляется последовательно в каждом из подпространств (6) методом покоординатного спуска. Подробный алгоритм решения оптимизационных задач синтезированным методом приводится в третьей главе диссертации.

Оптимизация режимов работы сетевых подогревателей, входящих в состав станционной ТФУ (рис. 1 (б)), представлена в работе решением ряда оптимизационных задач для установок разной структуры. В тексте диссертации приводятся аналитические решения оптимизационной задачи для схем включения сетевых подогревателей, показанных на рис. 3. В качестве целевой функции оптимизации выбирается усредненное для всей ТФУ минимальное значение температуры насыщения греющего пара, которая обеспечивает заданную тепловую нагрузку. Температура насыщения в подогревателе определяется давлением пара в источнике с учетом потерь в трубопроводе.

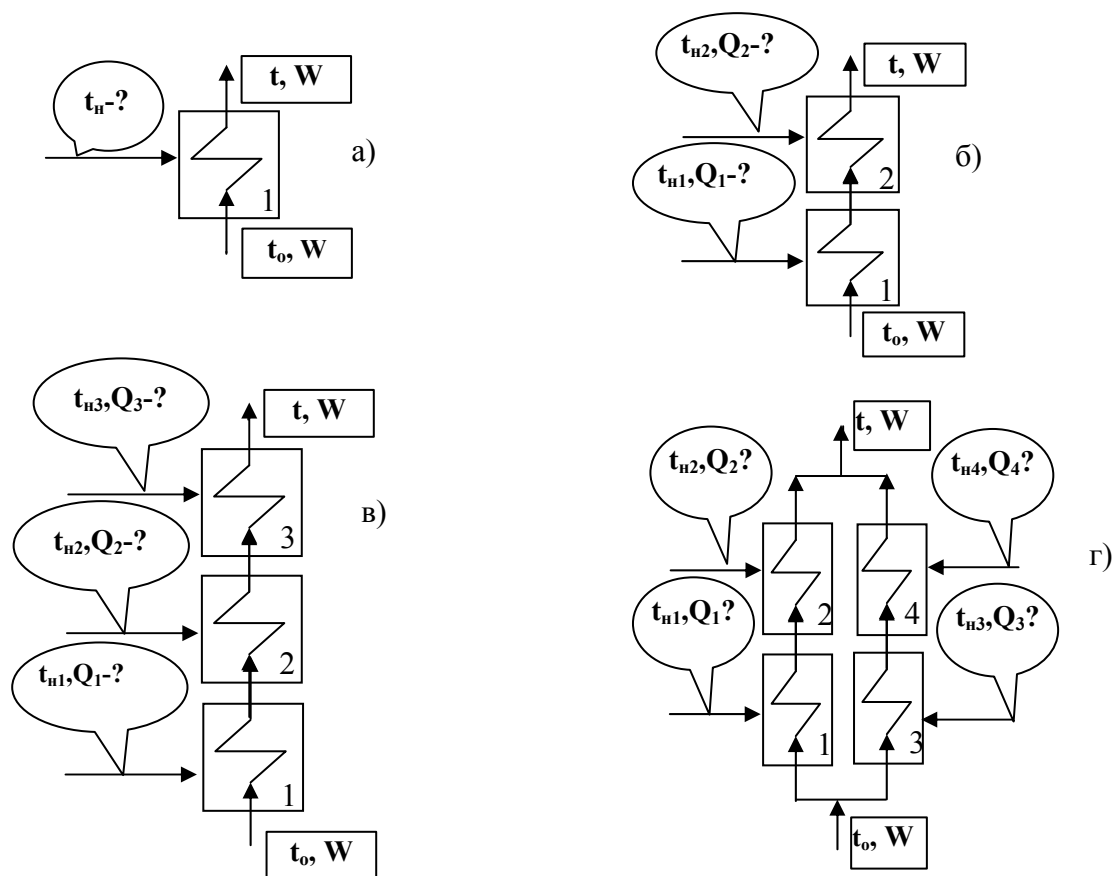


Рис. 3. Схемы одноступенчатого (а), двухступенчатого (б), трехступенчатого (в) и двухступенчатого двухпоточного (г) подогрева сетевой воды в станционной ТФУ

Вид целевой функции для наиболее интересного и сложного случая схемы включения сетевых подогревателей, приведенной на рис. 3 (г) имеет следующий вид

$$F_z = t_{n1}(x) \frac{Q_1(x)}{Q} + t_{n2}(x) \frac{Q_2(x)}{Q} + t_{n3}(x) \frac{Q_3(x)}{Q} + t_{n4}(x) \frac{Q_4(x)}{Q} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где Q_i – тепловая нагрузка в i -ого подогревателя.

Аналитическое решение задачи (7) проиллюстрировано на рис. 4 в виде зависимостей температуры насыщения греющего пара в четырех подогревателях (кривые 1–4) и целевой функции (кривая 5) от потокораспределения сетевой воды между двумя нитками подогревателей.

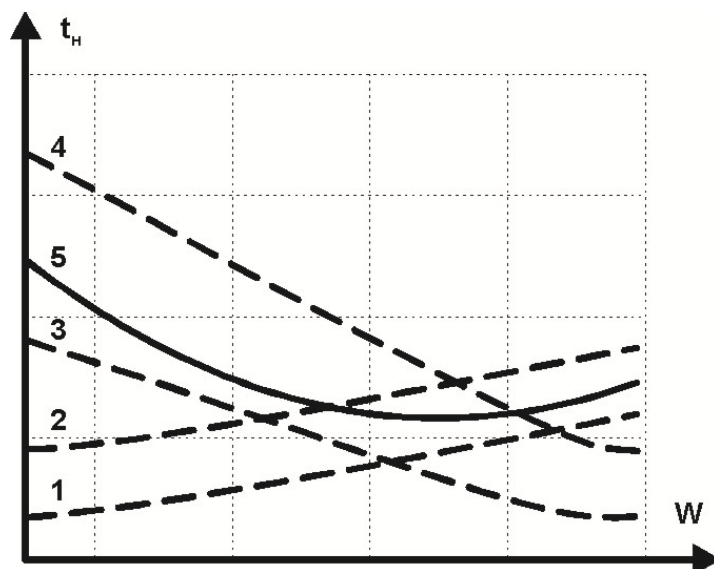


Рис. 4. Характер зависимостей температуры насыщения в первом (1), втором (2), третьем (3), четвертом (4) подогревателях (схема рис. 3 (г)) и целевой функции (5) от расхода сетевой воды через первую нитку (подогреватели 1, 2)

Разработанные модели и методы решения оптимизационных задач использованы при построении программного комплекса «ТЭС–Эксперт».

Третья глава посвящена описанию структуры программного комплекса «ТЭС–Эксперт» и решаемых с его помощью задач.

Программный комплекс «ТЭС–Эксперт» предназначен для решения на тепловых электростанциях следующих задач:

- оперативного ведения оптимального режима работы электростанции путем выдачи по результатам расчета конкретных значений регулируемых параметров работы оборудования, обеспечивающих минимум затрат топлива в текущих условиях;
- перспективного планирования показателей работы электростанции с выбором оптимального состава работающего оборудования и его режимной оптимизацией при заданных графиках суммарных тепловых и электрических нагрузок;
- автоматизированного расчета фактических и номинальных технико-экономических показателей (ТЭП) работы оборудования, резервов тепловой экономичности.

Структура программного комплекса с указанием информационных потоков между основными информационными и расчетными модулями приведена на рис. 5.

Комплекс объединяет следующие программные модули:

– «ТЭС-Эксперт. Схема». Содержит расчетные (балансовые) схемы электростанции, отражающие структуру связей между отдельными агрегатами, группами оборудования. Заданная в электронном виде топология этих связей является основой для построения систем балансовых уравнений, автоматизиро-

ванное решение которых является обязательным этапом, предшествующим расчету фактических и номинальных ТЭП;

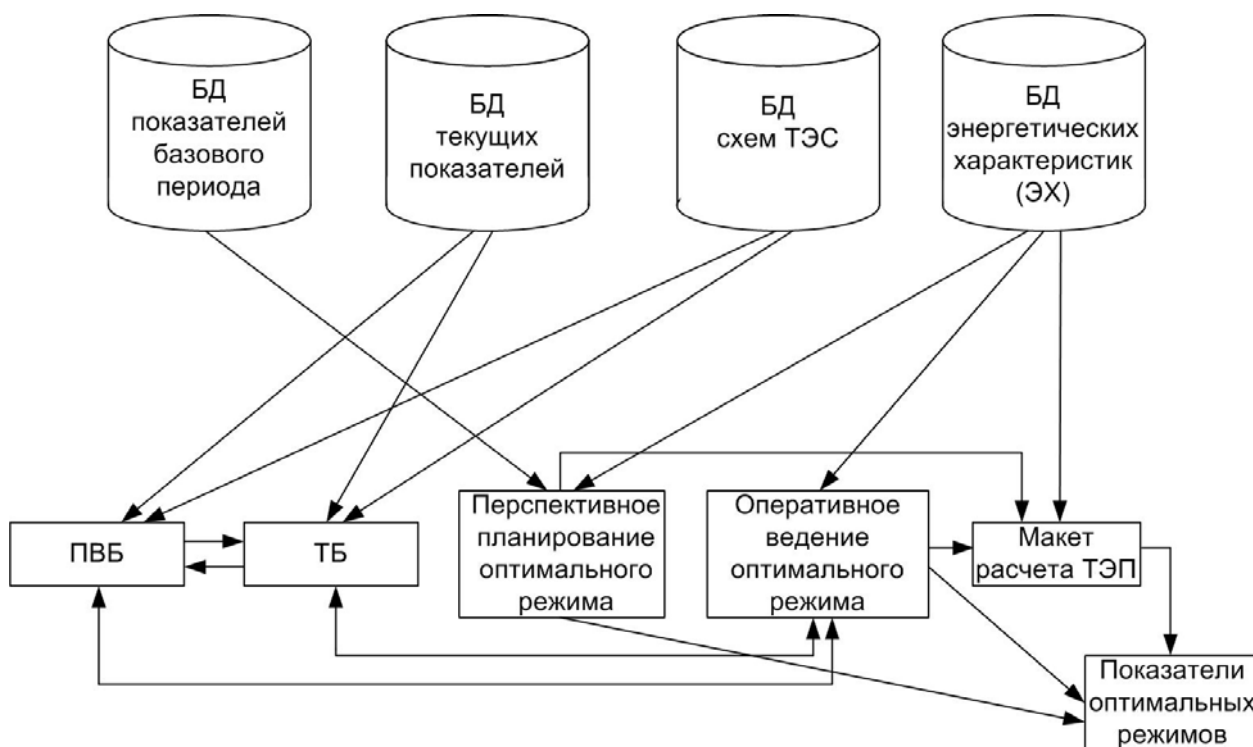


Рис. 5. Структура программного комплекса «ТЭС Эксперт» с указанием информационных потоков между основными информационными и расчетными модулями: БД – база данных; ТБ – модуль сведения тепловых балансов; ПВБ – модуль сведения пароводяных балансов; ЭХ – расчет и компьютерное представление энергетических характеристик оборудования; ТЭП – технико-экономические показатели

– **«ТЭС-Эксперт. Энергетические характеристики»**. Содержит в электронном виде альбом энергетических характеристик оборудования, входящих в состав нормативно-технической документации электростанции по топливоиспользованию. Поскольку энергетические характеристики традиционно представляются в графическом виде, данный модуль программного комплекса снабжен автоматизированной подсистемой представления энергетических характеристик в электронном виде;

– **«ТЭС-Эксперт. Пароводяной баланс», «ТЭС-Эксперт. Тепловой баланс»**. Обеспечивают проведение расчетов по сведению пароводяного и теплового балансов электростанции на основе измеренных значений показателей работы оборудования. Сведение балансов необходимо для согласования между собой множества измеренных показателей, уточнения на этой основе фактических нагрузок агрегатов и повышения точности последующего расчета ТЭП;

– **«ТЭС-Эксперт. Макет»**. Объединяет расчетные алгоритмы, необходимые для определения фактических и номинальных ТЭП и резервов тепловой экономичности, а также автоматического формирования регламентируемых нормативными документами отчетных форм о работе оборудования электростанции;

– «ТЭС-Эксперт. Оптимизация». Основной модуль, предназначенный непосредственно для выполнения оптимизационного расчета. Алгоритм решения оптимизационных задач синтезированным методом, реализованный в данном модуле, представлен на рис. 6. Множество параметров оптимизации в каждом подпространстве (6) заменяется одним параметром оптимизации, который определяет положение точки на линии проекции градиента. Если при решении одномерной оптимизационной задачи вдоль проекции градиента значение параметра выходит за пределы допустимого диапазона, то его значение приравнивается ближайшему допустимому значению параметра. При нахождении оптимального значения или достижении границы области поиска в данном подпространстве оптимизация завершается. За одну итерацию указанная процедура проводится последовательно для каждого из подпространств параметров оптимизации (6). Вычисления прекращаются после достижения заданной точностью (ϵ) расхождения значений целевой функции (F) для двух последовательных итераций. Число параметров оптимизации при использовании синтезированного метода уменьшается с $(3n - 3)$ до 3 по числу ограничений в выражении (3). При этом существенно снижаются ресурсные затраты на решение задачи, что делает возможным ее решение в оперативном режиме.

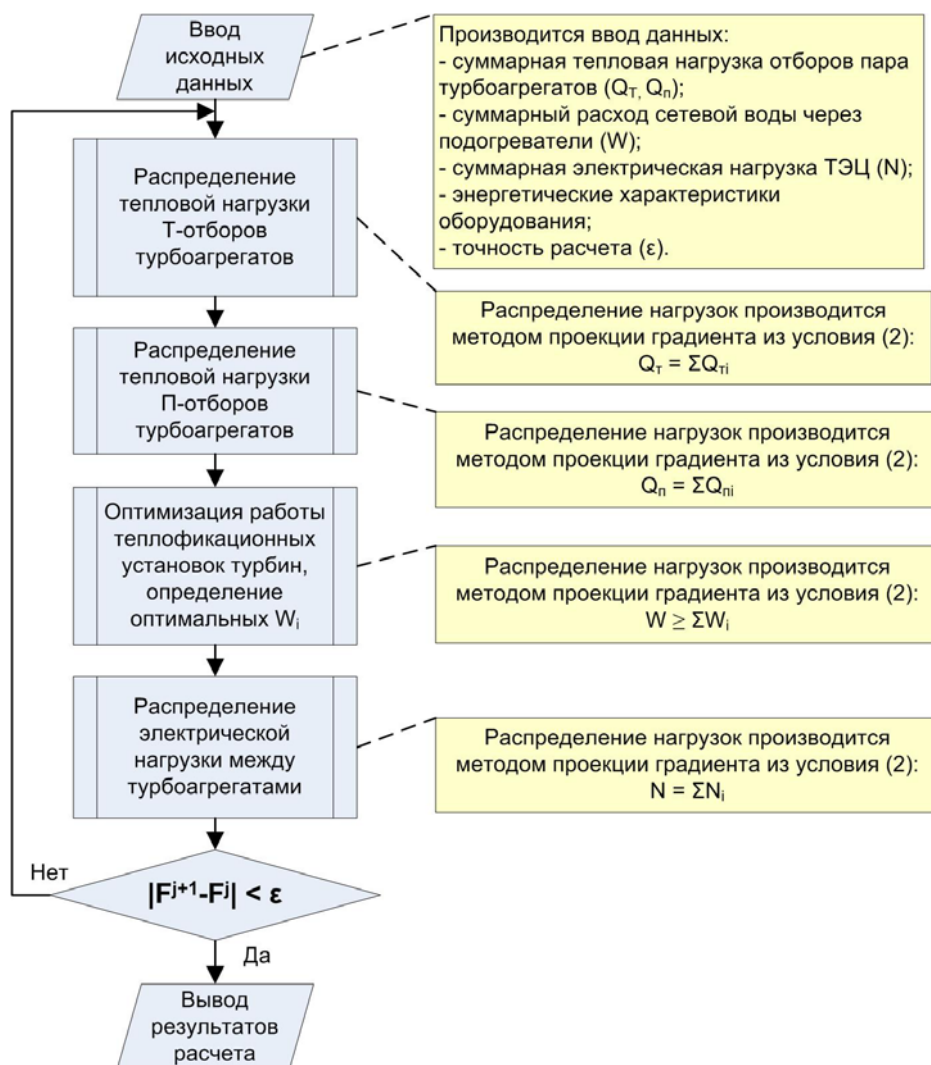


Рис. 6. Алгоритм синтезированного метода решения задачи оптимизации загрузки оборудования ТЭС

Программный комплекс разработан в среде программирования Lazarus и предназначен для использования на IBM-совместимых компьютерах под управлением операционных систем семейства Microsoft Windows. Графический интерфейс ориентирован на пользователя, имеющего квалификацию технолога (рис. 7). Программный комплекс интегрирован с СУБД и пакетами прикладных программ ТЭЦ. Для устойчивой работы программного комплекса необходим процессор тактовой частотой не менее 1000 МГц и оперативная память объемом не менее 1024 Мб.

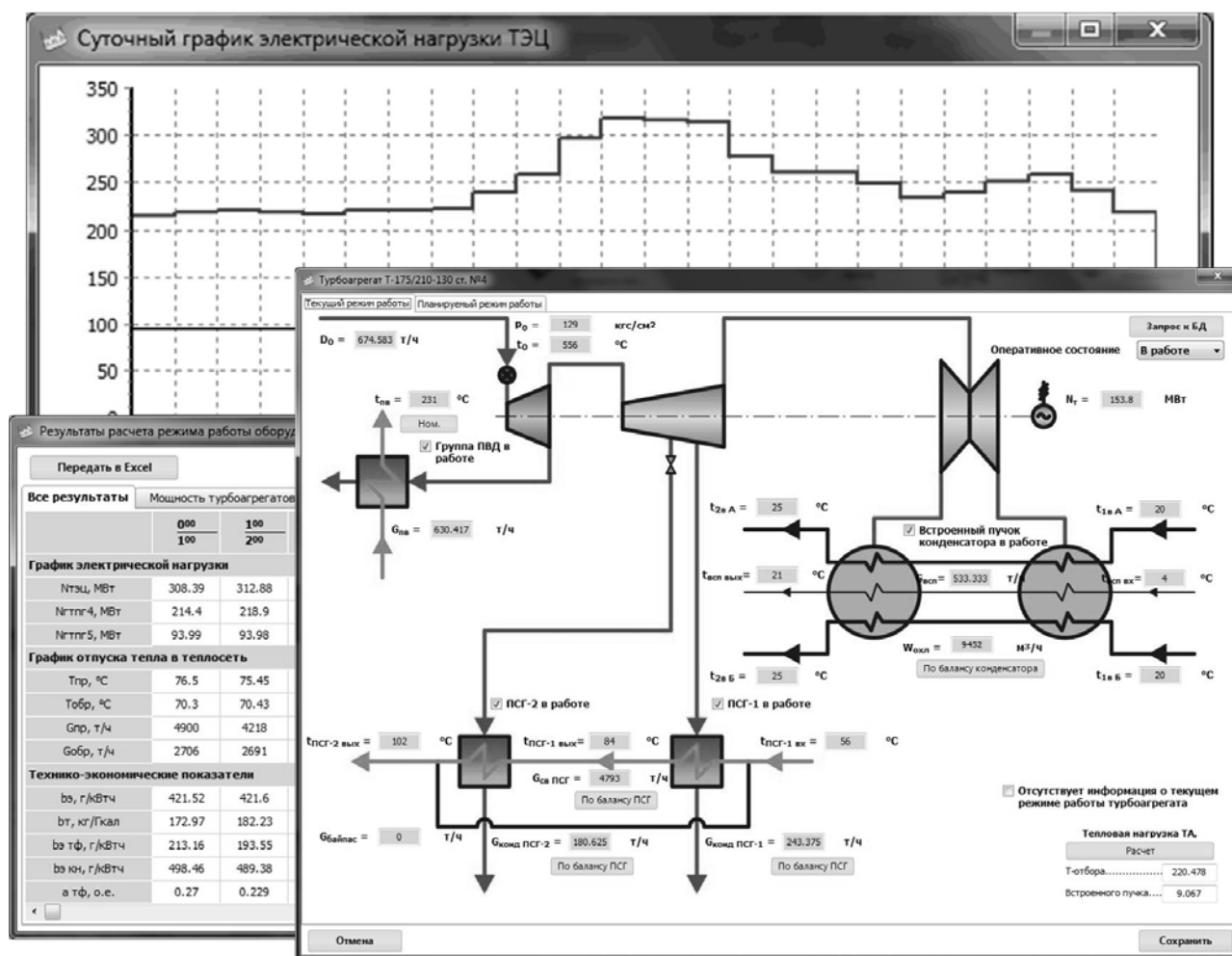


Рис. 7. Примеры экранных форм программного комплекса «ТЭС–Эксперт»

В четвертой главе приведены результаты практического использования результатов работы.

Программный комплекс «ТЭС–Эксперт» внедрен на Владимирской ТЭЦ-2 ОАО «ТГК-6» и Омской ТЭЦ-5 ОАО «ТГК-11», что подтверждено соответствующими документами. Адаптация программного комплекса к условиям ТЭЦ включала следующие основные этапы: разработку балансовых схем и формирование на их основе структуры потоков энергоносителей; представление энергетических характеристик оборудования в электронном виде и синтез математической модели системы из моделей её подсистем; формирование блоков исходных данных применительно к существующим схемам отпуска тепловой и

электрической энергии; привязку типовых алгоритмов расчета ТЭП и резервов тепловой экономичности к условиям работы электростанции.

Специфика решаемой задачи для Владимирской ТЭЦ-2 (состав турбинного оборудования: один турбоагрегат ПТ-54,5-120/13, два турбоагрегата Т-93-120 и два турбоагрегата ПТ-80/100-130/13) состояла в необходимости учета в оптимизационном алгоритме потокораспределения сетевой воды между индивидуальными и стационарными ТФУ. Реализованные технологические решения по повышению эффективности использования теплофикационных установок, оптимизации состава работающего оборудования и распределения тепловых и электрических нагрузок между агрегатами обеспечили получение годовой экономии тепловой энергии с перегретым паром котлов в количестве 14 000 Гкал (58 615,2 ГДж).

На примере Владимирской ТЭЦ-2 проведены расчетные исследования, по результатам которых для турбоагрегатов с индивидуальными ТФУ разработаны способы расширения регулировочных диапазонов нагрузок с использованием регулируемого байпасирования и рециркуляции сетевой воды. В частности показано, что при большом суммарном расходе сетевой воды на ТЭЦ и малых тепловых нагрузках с горячей водой целесообразно использовать байпасирование сетевой воды помимо сетевых подогревателей, а при малом расходе сетевой воды и больших тепловых нагрузках – рециркуляцию сетевой воды. Разработан способ расчета необходимых для расширения регулировочного диапазона нагрузок расходов сетевой воды через регулируемый байпас или рециркуляцию, использующий совместную характеристику турбоагрегата и теплофикационной установки (рис. 2).

Расчетная схема Омской ТЭЦ-5 ОАО «ТГК-11» включает группу оборудования с параллельными связями по свежему пару и питательной воде, объединяющую два турбоагрегата ПТ-80/100-130/13 и один турбоагрегат Т-175/210-130, а также два теплофикационных энергоблока с турбоагрегатами Т-175/210-130 и Т-185/220-130, имеющих слабые параллельные связи по свежему пару. В технологической схеме отпуска теплоты с горячей водой, кроме пяти ТФУ, установленных индивидуально с каждым турбоагрегатом, имеются пиковые подогреватели сетевой воды, пиковые водогрейные котлы, а также конденсаторы избыточного пара последних ступеней пяти многоступенчатых испарительных установок. Внедрение результатов работы на Омской ТЭЦ-5 обеспечило получение годовой экономии топлива в количестве 7 000 тонн в условном исчислении.

Для условий работы оборудования Омской ТЭЦ-5 проведены варианты расчеты, результаты которых (табл. 2) доказывают, что включение в параметры оптимизации расходов воды через сетевые подогреватели при оптимизации режима работы турбоагрегатов ТЭЦ обеспечивает получение экономии топлива, сопоставимой с экономией топлива за счет оптимизации без учета режимных параметров работы ТФУ. В частности, полученные данные показывают, что для рассматриваемой ТЭЦ режимная оптимизация турбинного оборудования при фиксированных расходах сетевой воды через подогреватели обеспечивает уменьшение среднегодового значения удельного расхода условного топлива на

отпуск электроэнергии с 349,3 до 342,2 г у.т./кВт·ч, то есть на 7,1 г у.т./кВт·ч, а включение в параметры оптимизации расходов воды через сетевые подогреватели позволяет получить дополнительную экономию топлива в размере 7,4 г у.т./кВт·ч (с 342,2 до 334,8 г у.т./кВт·ч).

Таблица 2

Показатель, единица измерения		Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год
Температура наружного воздуха, °С		-19,9	-12,7	-2,5	4,5	13,7	18,0	22,0	17,4	8,8	5,4	-0,1	-11,4	3,6
Электрическая нагрузка ТЭЦ, МВт		602,4	607,0	499,4	492,6	355,3	271,0	281,1	280,4	351,4	456,0	440,8	501,7	427,7
Тепловая нагрузка внешних потребителей с сетевой водой, МВт		1019,4	888,8	660,8	552,7	318,1	174,7	129,7	168,2	273,1	489,0	570,9	796,8	502,6
То же, с паром, МВт		4,78	5,00	4,86	4,24	1,49	2,73	1,24	0,00	0,00	0,00	2,87	3,08	2,51
Расход прямой сетевой воды, кг/с		4857	4886	4913	4550	2789	1630	1233	1710	2126	4018	4696	4671	3502
Расход обратной сетевой воды, кг/с		4417	4390	4399	4036	2110	978	800	1104	1406	3481	4244	4306	2968
Температура прямой сетевой воды, °С		101,5	90,9	73,8	71,0	74,0	79,4	79,4	78,3	75,8	70,2	70,7	88,9	80,3
Температура обратной сетевой воды, °С		56,4	52,8	46,5	47,0	57,4	74,6	75,0	74,2	62,6	46,4	45,8	52,1	52,7
Удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии (фиксированный), кг у.т./ГДж*		32,8	27,8	34,1	35,0	36,7	39,4	41,7	41,4	38,4	35,5	33,5	32,8	33,8
Удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии, расчетный, г у.т./кВт·ч	без оптимизации	310,4	330,9	302,0	316,4	365,6	427,2	460,7	447,1	393,8	346,6	329,9	313,2	349,3
	при режимной оптимизации без учета ТФУ	308,4	326,6	299,4	311,6	347,6	412,7	448,0	433,8	390,6	342,6	317,3	307,9	342,2
	при режимной оптимизации с учетом ТФУ	306,6	324,4	280,2	304,1	336,9	401,6	440,6	427,4	385,4	334,5	309,3	303,4	334,8

* удельные расходы условного топлива на отпуск электроэнергии во всех вариантах расчета приведены к фиксированному (равному фактическому значению для данного месяца) удельному расходу топлива на отпуск тепловой энергии.

Разработанные математические модели энергетического оборудования, методы расчета и их программная реализация внедрены в учебный и научно-исследовательский процессы Ченстоховского политехнического университета (Польша) и Ивановского государственного энергетического университета.

Основные результаты работы

1. Сформулирована задача оптимального выбора режима и состава работающего турбинного оборудования ТЭЦ с учетом распределения потоков теплоносителей между сетевыми подогревателями индивидуальных и стационарных теплофикационных установок.

2. Разработан автоматизированный программный модуль для представления моделей энергетического оборудования в электронном виде. Выполнен анализ методов компьютерного представления энергетических характеристик оборудования ТЭС; показано, что наиболее приемлемым вариантом является использование кубических сплайнов, обеспечивающее описание энергетических характеристик с максимальной относительной погрешностью не более 0,01 %.

3. Разработан модифицированный метод множителей Лагранжа, учитывающий как ограничения на суммарные нагрузки **группы турбоагрегатов**, так и технологические ограничения на допустимые диапазоны режимных параметров оборудования, на основании которого получено аналитическое решение задачи оптимального распределения нагрузок между турбоагрегатами.

4. Предложен синтезированный метод численного решения задачи оптимального распределения нагрузок между турбоагрегатами ТЭЦ, сочетающий два метода: метод направленного поиска в многомерных подпространствах параметров тепловых и электрических нагрузок и метод покоординатного поиска между этими подпространствами, учитывающий ограничения по суммарным нагрузкам и ограничения на область допустимых значений режимных параметров каждого агрегата. Разработан алгоритм компьютерной реализации синтезированного метода. Число параметров оптимизации при использовании синтезированного метода уменьшается, что существенно снижает ресурсные затраты на решение задачи и делает возможным ее решение в оперативном режиме.

5. Разработан программный комплекс «ТЭС–Эксперт», защищенный свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, позволяющий производить выбор оптимального состава и режима работы турбоагрегатов ТЭЦ при заданных графиках суммарных электрической и тепловой нагрузок и прогнозировать технико-экономические показатели работы оборудования в расчетных режимах.

6. Получены новые данные, доказывающие, что включение в параметры оптимизации расходов воды через сетевые подогреватели индивидуальных ТФУ при оптимизации режима работы турбоагрегатов ТЭЦ обеспечивает получение экономии топлива, сопоставимой с экономией топлива за счет оптимизации без учета режимных параметров работы ТФУ. Для условий Омской ТЭЦ-5 ОАО «ТГК-11» показано, что режимная оптимизация турбинного оборудования без учета показателей работы ТФУ позволяет получить экономию топлива в размере 7,1 г у.т./кВт·ч, а включение в параметры оптимизации расходов воды через сетевые подогреватели обеспечивает дополнительную экономию топлива в размере 7,4 г у.т./кВт·ч.

7. Программный комплекс «ТЭС–Эксперт» внедрен на Владимирской ТЭЦ-2 ОАО «ТГК-6» и Омской ТЭЦ-5 ОАО «ТГК-11». Реализованные техно-

логические решения обеспечили получение годовой экономии тепловой энергии на Владимирской ТЭЦ-2 в количестве 14 000 Гкал (58 615,2 ГДж) и годовой экономии условного топлива на Омской ТЭЦ-5 в количестве 7 000 тонн. Разработанные математические модели энергетического оборудования, методы расчета и их программная реализация внедрены в учебный и научно-исследовательский процессы Ченстоховского политехнического университета (Польша) и Ивановского государственного энергетического университета.

Основные положения диссертации опубликованы:

В ведущих рецензируемых журналах и изданиях (по списку ВАК):

1. **Борисов, А.А.** Задача оптимальной загрузки оборудования ТЭЦ с учетом распределения сетевой воды между подогревателями и комбинированный метод ее решения [Текст] / А.А. Борисов, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, С.А. Петрованов // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 4. – С. 10-12.
2. **Борисов, А.А.** Оптимизация многоступенчатых теплофикационных установок [Текст] / А.А. Борисов, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 4. – С. 38-41.
3. Барочкин, Е.В. Разработка методов расчета и оптимизации систем теплофикации на ТЭЦ [Текст] / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, **А.А. Борисов** // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 24-26.
4. Барочкин, Е.В. Программный Комплекс «ТЭС-ЭКСПЕРТ»: опыт оптимизации режимов работы оборудования ТЭЦ [Текст] / Е.В. Барочкин, А.А. Поспелов, В.П. Жуков, А.А. Андреев, Г.В. Ледуховский, **А.А. Борисов** // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 3-6.
5. Ледуховский, Г.В. Оптимизация режимов работы ТЭС [Текст] / Г.В. Ледуховский, **А.А. Борисов**, А.А. Поспелов, Е.В. Барочкин, В.П. Жуков // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып.4. – С. 170-171.
6. **Борисов, А.А.** Повышение эффективности работы ТЭЦ при использовании байпасирования и рециркуляции сетевой воды в теплофикационных установках турбин [Текст] / А.А. Борисов, Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов, М.Ю. Зорин // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 2. – С. 21-26.
7. Ледуховский, Г.В. Учебно-лабораторный комплекс по оптимизации режимов работы теплофикационных турбоагрегатов [Текст] / Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов, **А.А. Борисов** // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 2. – С. 11-14.
8. **Борисов, А.А.** Об учете влияния неравномерности суточных графиков электрической нагрузки при расчете номинальных удельных расходов топлива по энергоблокам [Текст] / А.А. Борисов, А.А. Поспелов, Г.В. Ледуховский // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 4. – С. 27-29.

В монографии и в других журналах и материалах конференций:

9. Жуков, В.П., Барочкин, Е. В. Системный анализ энергетических теплообменных установок [Текст] / **А.А. Борисов**, разд. 4.5, 4.6, – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина». – 2009. – 176 с. ISBN 978-5-89482-625-7.

10. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2011611242. «ТЭС-Эксперт». Макет расчета фактических показателей работы ТЭЦ [Текст] / Е.В. Барочкин, **А.А. Борисов**, Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов; зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 07.02.11.
11. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2011611931. «ТЭС-Эксперт». Пароводяной баланс [Текст] / Е.В. Барочкин, **А.А. Борисов**, Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов; зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 02.03.11.
12. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2009612236. «ТЭС-Эксперт». Владимирская ТЭЦ [Текст] / Е.В. Барочкин; **А.А. Борисов**, Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов; зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 30.04.09.
13. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2009612298. «ТЭС-Эксперт». Саранская ТЭЦ [Текст] / Е.В. Барочкин; **А.А. Борисов**, Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов; зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 06.05.09.
14. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2009611813. «ТЭС-Эксперт» (базовая версия) [Текст] / Е.В. Барочкин; **А.А. Борисов**, Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов; зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 07.04.09.
15. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2010618057. Программный комплекс для автоматизированного расчета оптимального состава и загрузки основного оборудования для планирования, анализа и управления режимами работы ТЭС ОАО «ТГК-11» (ТЭЦ-5) в условиях действующих регламентов НОРЭМ и Системного оператора для нужд Омского филиала ОАО «ТГК-11» [Текст] / Е.В. Барочкин; **А.А. Борисов**, Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов; зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 20.12.10.
16. **Борисов, А.А.** Оптимизация загрузки оборудования ТЭЦ с учетом распределения сетевой воды между подогревателями [Текст] / А.А. Борисов, В.П. Жуков, С.А. Петрованов, А.А. Ефимов // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2010, –С.14-21.
17. **Борисов, А.А.** Модифицированный метод неопределенных множителей Лагранжа для оптимизации нагрузок ТЭЦ [Текст] / А.А. Борисов, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования», – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2010, – С. 28-31.
18. **Борисов, А.А.** Учет режима работы теплофикационных установок при оптимизации режимов совместной работы турбин [Текст] / А.А. Борисов, Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов // Материалы междунар. науч. - техн. конф. «Состояние и перспективы развития энерготехнологии» «XV Бенардосовские чтения»: В 2 т. Т 1 – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2009. – С. 181-182.

19. **Борисов, А.А.** Оптимизация режимов работы тепловых электростанций с учетом теплофикационной установки [Текст] / А.А.Борисов, В.П. Жуков, С.А. Петрованов, А.А. Ефимов // Сборник трудов межд. конф. «Математические методы в технике и технологии ММТТ-22», 2009, г. Псков, т.10 - С.68-69.
20. **Борисов, А.А.** Программный комплекс для оптимального планирования режимов работы Владимирской ТЭЦ-2 [Текст] / А.А. Борисов, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский // Пятнадцатая Междунар. науч. – техн. конф. студентов и аспирантов. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» Тез. докл. В 3-х т. – М.: МЭИ, 2009. Т.3. – С. 183-184.
21. Андреев, А.А. Программный комплекс «ТЭС–ЭКСПЕРТ» [Текст] / А.А. Андреев, Г.В. Ледуховский, **А.А. Борисов**, Е.В. Барочкин, А.А. Пospelов // Двенадцатая Междунар. науч. – техн. конф. студентов и аспирантов. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» Тез. докл. В 3-х т. – М.: МЭИ, 2006. Т.3. – С. 181-183.
22. Аксенова, А.В. Оптимизация режимов совместной работы турбоагрегатов тепловых электростанций [Текст] / А.В. Аксенова, А.В. Данилов, **А.А. Борисов**, Г.В. Ледуховский // Тезисы докладов региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия-2009» «Теплоэнергетика». – Иваново, ГОУ ВПО «Ивановский государ. энергетический университет», 2009, Т.1, – С. 9-10.
23. Барочкин, Е.В. Программный комплекс «ТЭС–Эксперт». Оптимизация загрузки оборудования ТЭЦ [Текст] / Е.В. Барочкин, А.А. Пospelов, Г.В. Ледуховский, А.А. Андреев, **А.А. Борисов** // Материалы Пятой Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», г. Ульяновск, 20-21 апреля 2006 г. Том 2. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – С. 134-137.

БОРИСОВ Антон Александрович

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ
ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЕЙ С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ
МЕЖДУ СЕТЕВЫМИ ПОДОГРЕВАТЕЛЯМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.

Подписано в печать 15.04.2011. Формат 50X84 1/16

Печать плоская. Усл. печ. Л. 1,37.

Тираж 110 экз. Заказ № ____.