



Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана

Многокритериальная оптимизация режимов работы котельного отделения электростанции

Автор: **Кузьмин Артем Юрьевич**,
студент группы ИУ7-49

Научный руководитель: **Романова Татьяна Николаевна**,
доцент каф. ИУ-7, к.ф.-м.н.

Москва, 2014

Цель и задачи работы

Цель работы – разработка метода многокритериальной оптимизации режимов работы котельного отделения электростанции и его исследование на примере котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго .

Решаемые задачи:

1. Анализ существующих оптимизационных продуктов и решений;
2. Анализ существующих алгоритмов оптимизации и выбор одного из них для реализации;
3. Разработка математической модели многокритериальной оптимизации;
4. Разработка метода многокритериальной оптимизации;
5. Разработка программного продукта на основе данного метода;
6. Исследование разработанного метода и сравнение полученных результатов с другими известными результатами.

Существующие продукты и решения

Таблица 1 – Существующие оптимизационные продукты

<p>«СМиОР» – система моделирования и оптимизации режимов работы. (ЗАО «Крок инкорпорейтед», 2012).</p> <p>Основной бизнес-процесс – «I4Plan».</p> <p>Используемые продукты – IBM ILOG (CPLEX, JVIEWS), Thermoflex.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Использование имитационного моделирования; • Мощные математический и визуализационный модули; • Возможность расчета и сравнения нескольких сценариев. 	<p>ПК для оптимизации режимов работы тепловых электростанций.</p> <p>(Иванов Н.С., Беспалов В.И., Лопатин Н.С. – «Известия Томского политехнического университета, 2008).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Возможность «динамической» оптимизации и оптимизации на заданном оборудовании; • Использование БД для хранения информации; • Наличие ручного модуля распределения нагрузок персоналом. 	<p>ПК «ТЭС-Эксперт» – оптимальное ведение режима работы теплоэлектроцентрали. (Борисов А.А. – «Вестник ИГЭУ», 2008).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Оптимизация режимов работы как котлоагрегатов, так и турбоагрегатов; • Возможность планирования затрат тепла и электроэнергии.
--	---	---

Во всех рассмотренных продуктах – отсутствие возможности оптимизации по нескольким критериям, учета информации о коэффициентах относительной важности критериев.

Алгоритмы оптимизации

Таблица 2 – Рассмотренные алгоритмы оптимизации

Адаптивный алгоритм случайного поиска с переменным шагом.	Комбинаторный эвристический алгоритм.	Прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска.
<ul style="list-style-type: none"> • Эффективен на начальной стадии вычислений для задач, содержащих не более 10 переменных; • Для получения решения с большей точностью скорость сходимости алгоритма недостаточна; • Целесообразно использовать как вспомогательный прием для определения «хорошей» начальной точки при применении более сложных методов оптимизации. 	<ul style="list-style-type: none"> • Более эффективный, чем алгоритм случайного поиска, - минимизирует обращение к выборкам; 	<ul style="list-style-type: none"> • Более эффективный, чем адаптивный или комбинаторный алгоритмы; • Наиболее эффективен для решения многоэкстремальных задач.

Выбран метод прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска. Остальные рассмотренные методы направлены, в основном, на поиска локального экстремума функции.

Постановка задачи

Задача оптимизации состоит в нахождении:

- оптимального состава очереди котлоагрегатов,
- паровых нагрузок для каждого из котлоагрегатов,
- вида топлива, используемого каждым из котлоагрегатов.

В качестве критериев оптимизации режимов работы котлоагрегатов выделим:

- расход газа -> **min**,
- расход жидкого топлива (мазута) -> **min**,
- финансовые затраты на используемое топливо -> **min**,
- коэффициент полезного действия (КПД) очереди котлоагрегатов -> **max**.

Математическая постановка задачи ОПТИМИЗАЦИИ

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{K1:} \ B^{\Gamma}(\{D_k\}) = \sum_{i=1}^n B_i^{\Gamma}(D_{Ki}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{K2:} \ B^{\mathbf{M}}(\{D_k\}) = \sum_{i=1}^m B_i^{\mathbf{M}}(D_{Ki}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{K3:} \ F_{\mathbf{M}+\Gamma}(\{D_k\}) = \sum_{i=1}^n B_{\Gamma i}(D_{Ki}) * p_{\Gamma} + \sum_{i=1}^m B_{\Gamma i}(D_{Ki}) * p_{\mathbf{M}} \rightarrow \min; \\ \mathbf{K4:} \ \eta_K = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{Ki\Gamma}(D_{Ki}) * Q_{Ki\Gamma}(D_{Ki}) + \sum_{j=1}^m \eta_{Kj\mathbf{M}}(D_{Kj}) * Q_{Kj\mathbf{M}}(D_{Kj})}{\sum_{i=1}^n Q_{Ki\Gamma}(D_{Ki}) + \sum_{j=1}^m Q_{Kj\mathbf{M}}(D_{Kj})} \rightarrow \max; \end{array} \right.$$

где $B_i^{\Gamma}(D_{Ki})$ – расход газа для обеспечения текущей паропроизводительности D_{Ki} i -ым парогенератором;
 $B_i^{\mathbf{M}}(D_{Ki})$ – расход мазута для обеспечения текущей паропроизводительности D_{Ki} i -ым парогенератором;
 $p_{\mathbf{M}}$ – цена на мазут; p_{Γ} – цена на газ;
 $\eta_{Ki}(D_{Ki})$ – КПД полезного действия i -го котлоагрегата;
 $\{D_k\} = \{D_{k1}, D_{k2}, \dots, D_{kn}\}$ – вектор паропроизводительностей n котлоагрегатов.

Целевая функция: $\mathbf{F} = \mathbf{K1} + \mathbf{K2} + \mathbf{K3} - \mathbf{K4} \rightarrow \min;$

Ограничения

1. Диапазоны рабочей производительности для каждого из котлоагрегатов

$$D_{Ki}^{min} \leq D_{Ki} \leq D_{Ki}^{max}, \quad i = 1 \dots n$$

где D_{Ki}^{min} – минимально допустимая паропроизводительность i -го котлоагрегата; D_{Ki}^{max} – максимально допустимая паропроизводительность i -го котлоагрегата; D_{Ki} – текущая паропроизводительность i -го котлоагрегата, n – количество котлоагрегатов в очереди.

2. Суммарная паропроизводительность группы котлоагрегатов

$$\sum_{i=1}^n D_{Ki} = D_k$$

где D_{Ki} – паропроизводительность i -го котлоагрегата; D_k – суммарная паропроизводительность группы работающих котлоагрегатов, n – количество котлоагрегатов очереди.

Метод многокритериальной ОПТИМИЗАЦИИ

Разработанный метод состоит из шагов:

1. Формирование множества возможных решений:

- Определение всех допустимых режимов работы очереди котлоагрегатов;
- «Локальная» оптимизация каждой из допустимых комбинаций.

2. Выбор наилучшего решения из множества возможных:

- Построение множества Парето;
- Сужение множества Парето на основе информации о коэффициентах относительной важности критериев;
- Применение метода целевого программирования для окончательного выбора оптимального решения.

Определение допустимых режимов работы очереди котлоагрегатов

Каждый из n котлоагрегатов может находиться в одном из состояний:

- Выключен;
- Работает на газе;
- Работает на мазуте;

Всего таких комбинаций 3^n .

Для каждой из комбинаций проверяется, может ли она обеспечить выполнение заданной суммарной паропроизводительности:

$$\sum_{i=1}^m D_{Ki}^{min} \leq D_k \leq \sum_{i=1}^m D_{Ki}^{max},$$

где m – количество работающих котлов в данной комбинации.

«Локальная» оптимизация

Оптимизация с помощью метода прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска.

D_K – суммарная паропроизводительность, которую должна обеспечивать очередь котлоагрегатов.

Необходимо определить $n-1$ переменных D_{Ki} (паровая нагрузка i -го котлоагрегата), где n – количество котлоагрегатов в очереди. Переменная D_{Kn} определяется из соотношения:

$$D_{Kn} = D_K - \sum_{i=1}^{n-1} D_{Ki}.$$

Выбор начальных решений

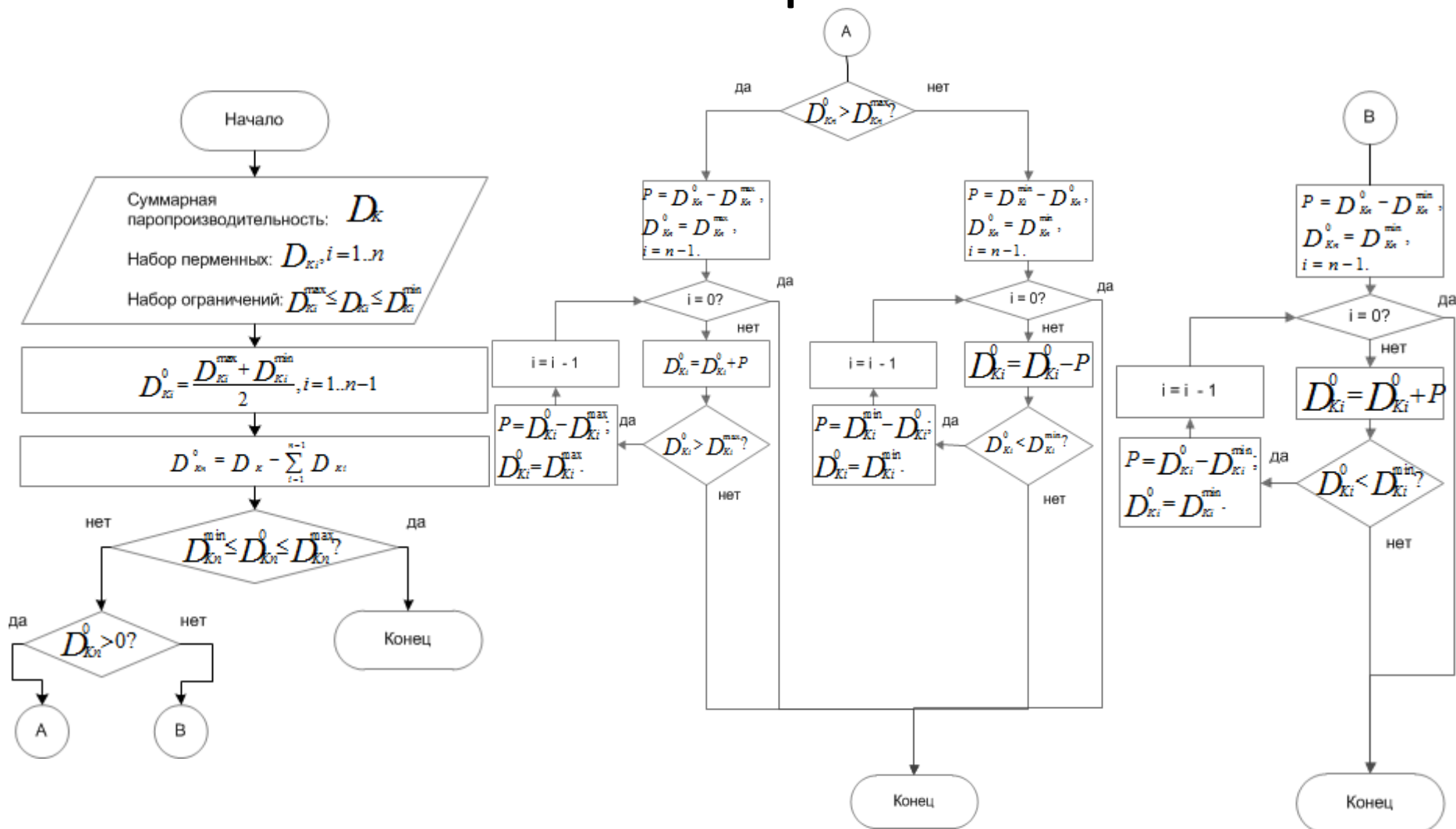
Выбор начальных решений, входящий в состав метода прямых выборочных процедур:

$$x_i^0 = \frac{x_i + \bar{x}_i}{2}, i = 1, \dots, n.$$

Для решения поставленной задачи такой выбор начальных решений **не подходит**. В работе приведен пример, обосновывающий данный вывод.

Предложен **модифицированный** алгоритм выбора начальных решений, **удовлетворяющий** всем заданным **ограничениям**.

Модифицированный алгоритм выбора начальных решений



где D_{Ki} – паровая нагрузка i -го котлоагрегата [т/час],

P – вспомогательная величина для распределения паровых нагрузок [т/час].

Построение и сужение множества Парето

Коэффициенты относительной важности критериев:

$$\theta_{ij} = \frac{w_j^*}{w_i^* + w_j^*}, \quad (0 < \theta_{ij} < 1).$$

Менее важный j -й критерий в общем списке критериев f_1, f_2, \dots, f_m необходимо заменить новым, вычисленным по формуле:

$$\theta_{ij}f_i + (1 - \theta_{ij})f_j.$$

где w_j^* - количество единиц по менее важному критерию, w_i^* - количество единиц по более важному критерию

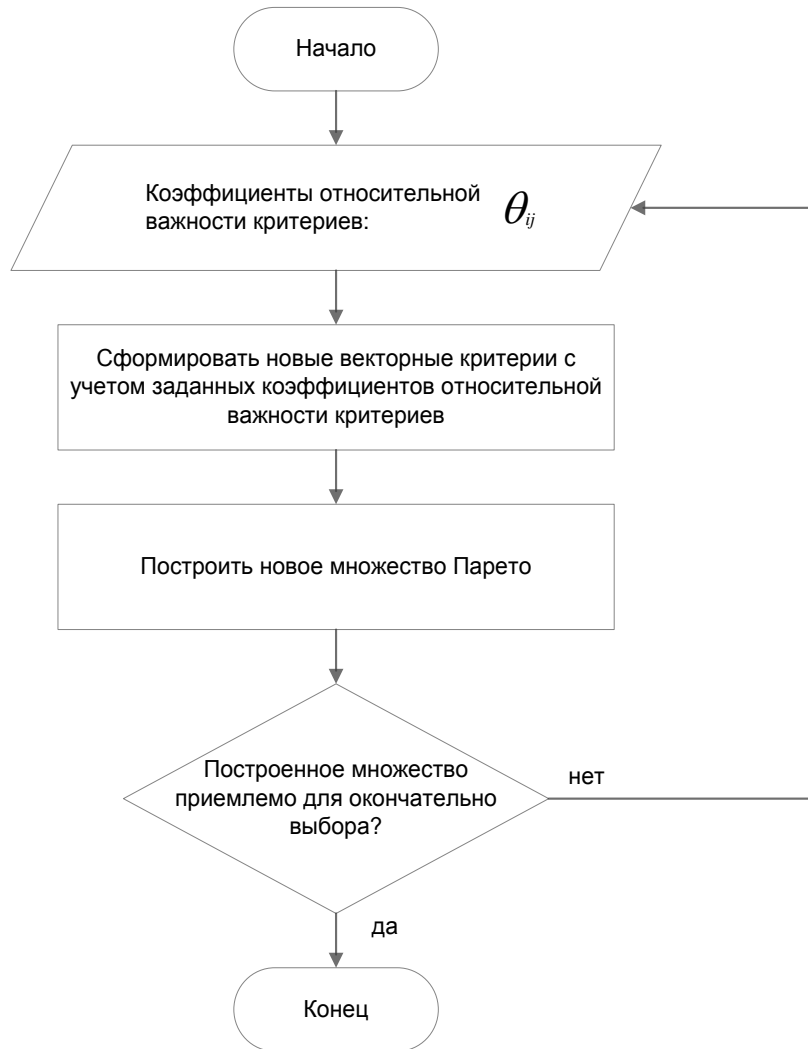


Рис.2 Алгоритм сужения множества Парето

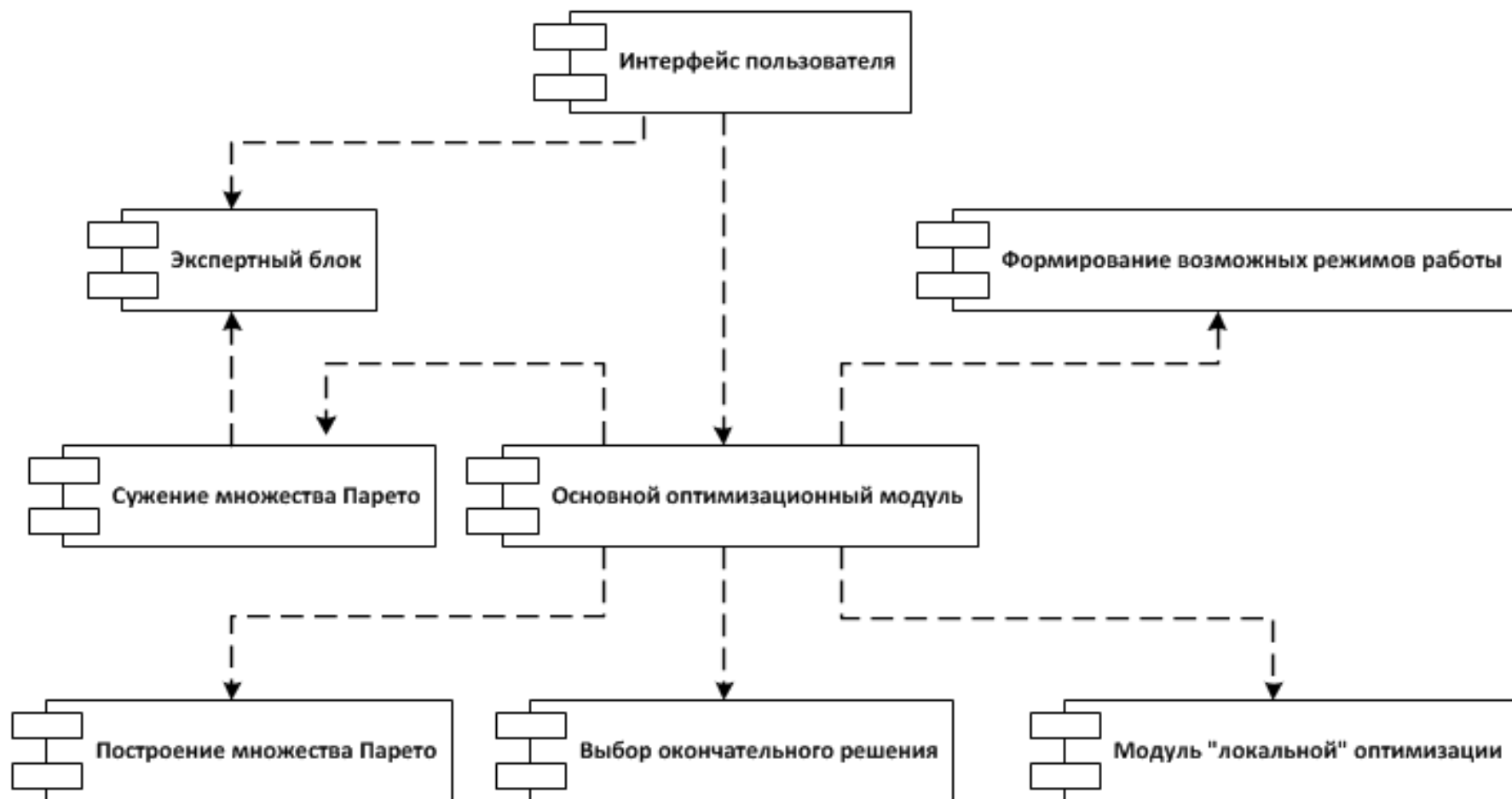
Метод целевого программирования

Задано:

«Идеальный» вектор в критериальном пространстве:	$y = (K_1, K_2, K_3, K_4);$ где K_1, K_2, K_3, K_4 – максимальные значения критериев оптимизации из всех значений, входящих в множество Парето-оптимальных решений;
Мера близости между векторами:	$\rho = \rho(y, z);$ где y, z – «идеальный» и сравниваемый вектор соответственно;

Оптимальное решение: вектор, ближе всего расположенный к «идеальному».

Модульная структура программного комплекса



Постановка эксперимента

1. Проверка адекватности разработанного метода

2. Расчет ситуаций, возможных для рынка электроэнергии:

- «Без приоритета»;
Сравнение полученных результатов с известными результатами;
- «Приоритет одного вида топлива».

Таблица 1 – Исходные данные для рассмотренных ситуаций

Ситуация	Цена на газ	Цена на мазут	Плановая паропроизводительность	Коэффициенты относительной важности
«Без приоритета»	3482 руб./тыс.нм ³	6500 руб./т	[100 т/час; 600 т/час], шаг 50 т/час	-
«Приоритет одного вида топлива»	3482 руб./тыс.нм ³	6500 руб./т	638 т/час	[10%; 90%], шаг 10%

Проверка адекватности метода

Количество экспериментов: 45 (3 котлоагрегата по 15 экспериментов);

Проведенный тест: U-тест Манна-Уитни;

Уровень статистической значимости: 5%;

Количественный признак: Расход топлива котлоагрегатом;

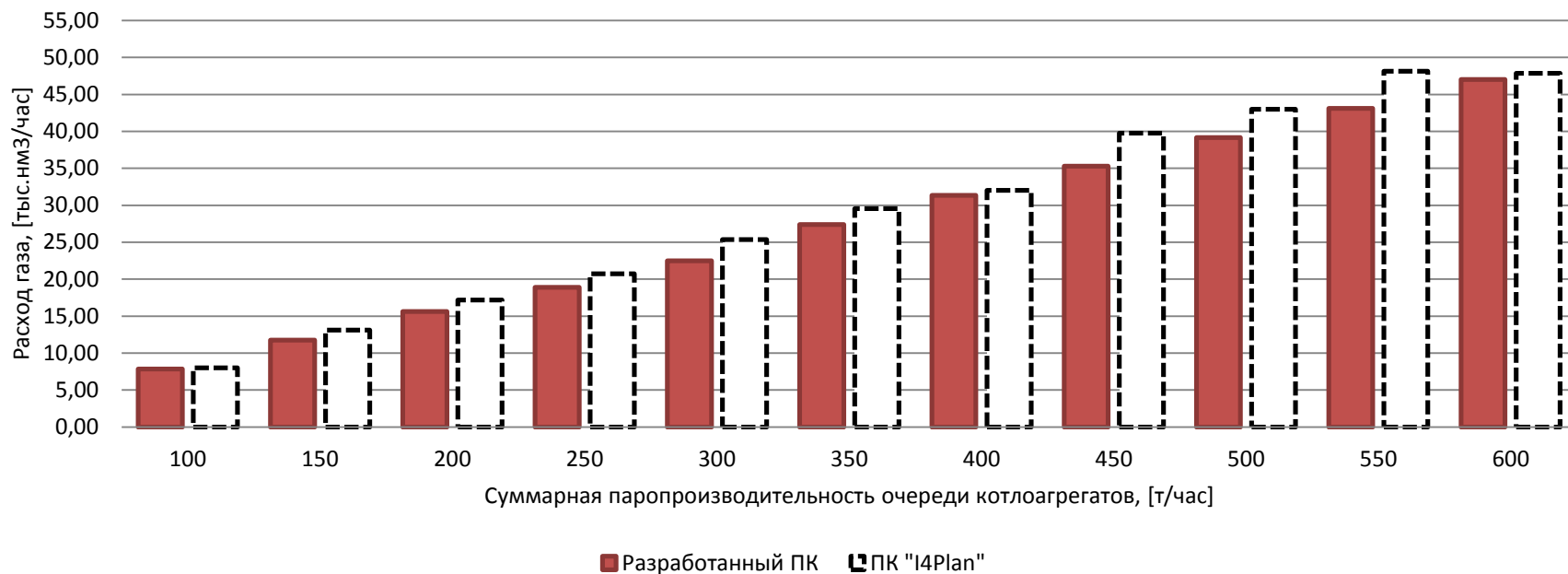
Результаты

Средний процент расхождений: 1.7%

Вывод: Значения, полученные с помощью разработанного программного комплекса **не менее значимы**, чем сравниваемые значения

Ситуация «Без приоритета»

Зависимости расхода топлива от суммарной паропроизводительности



Максимальный процент выигрыша: 12%;

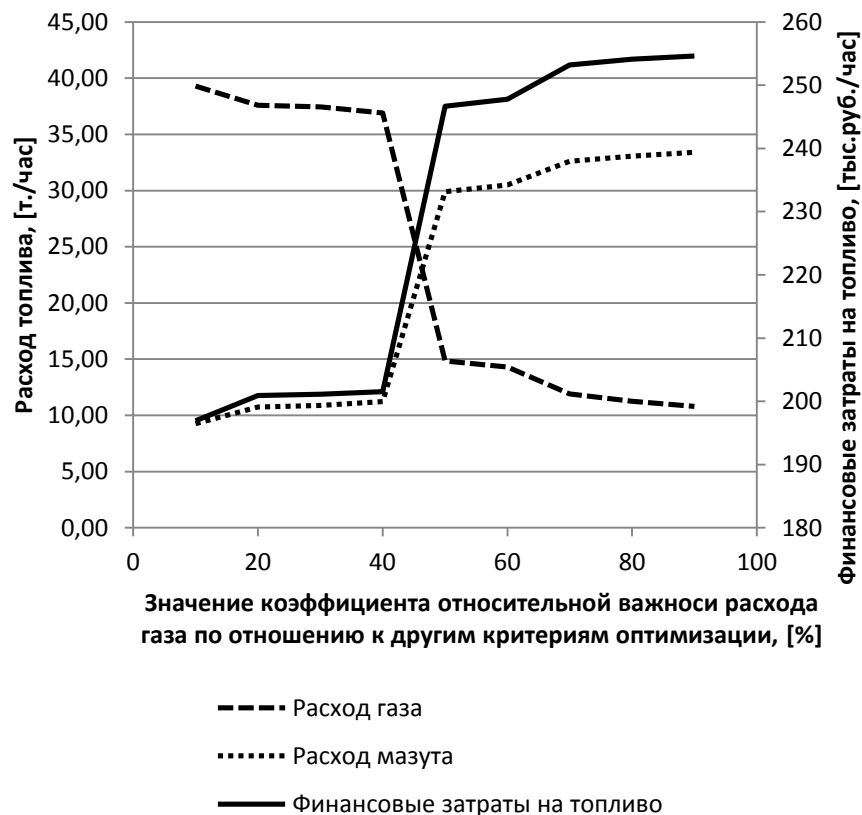
Минимальный процент выигрыша: 0,2%;

Средний процент выигрыша: 1.3%;

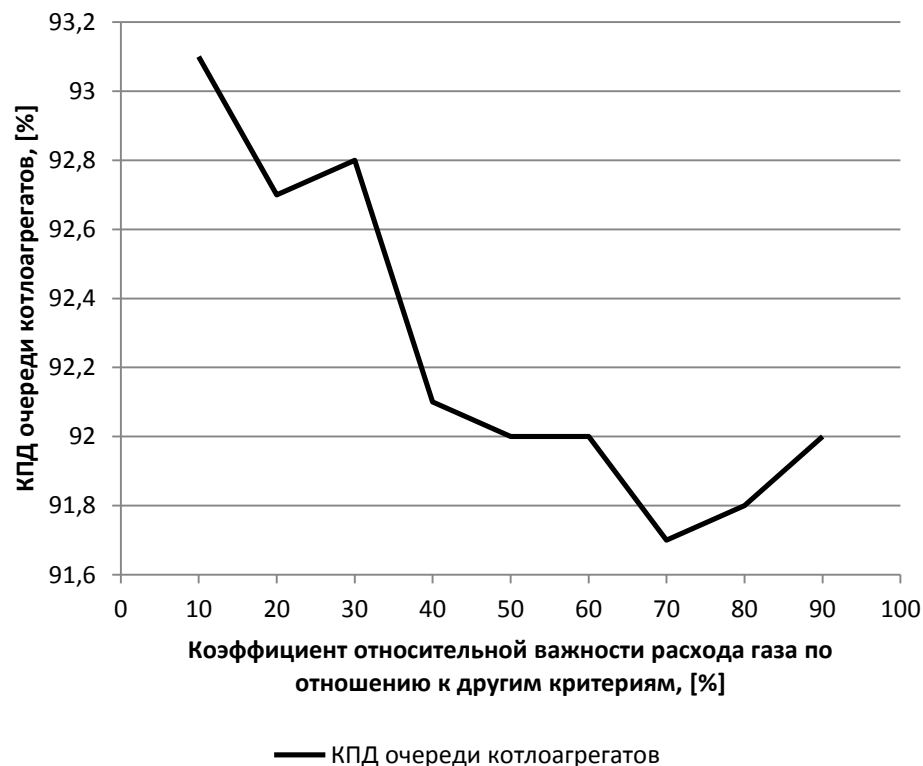
Экономия до 124 тыс. руб./месяц

Ситуация «Приоритет одного вида топлива»

Зависимости значений критериев оптимизации от коэффициентов относительной важности



Зависимость КПД очереди котлоагрегатов от коэффициентов относительной важности



Выводы по проведенным экспериментам

1. Проведена проверка адекватности разработанного метода;
2. Проведены эксперименты с целью поиска оптимального режима работы котельного отделения (уменьшение расхода топлива и финансовых затрат, увеличение КПД очереди котлоагрегатов);
3. Применение разработанного метода позволит получить экономическую прибыль для электростанции по сравнению с текущим решением.

Заключение

В результате работы:

1. Проведен анализ существующих оптимизационных продуктов и решений;
2. Проведен анализ существующих алгоритмов оптимизации и выбран один из них;
3. Разработана математическая модель многокритериальной оптимизации;
4. Разработан метод многокритериальной оптимизации;
5. Разработан программный комплекс, реализующий данный метод;
6. Проведено исследование разработанного метода и сравнение полученных результатов с другими известными результатами.