[Глоссарий 3](#_Toc389395764)

[Введение 4](#_Toc389395765)

[1 Аналитический раздел 5](#_Toc389395766)

[1.1 Постановка задачи 5](#_Toc389395767)

[1.2 Обзор существующих оптимизационных продуктов и решений 8](#_Toc389395768)

[1.2.1 Система моделирования и оптимизации режимов работы электростанции 8](#_Toc389395769)

[1.2.2 Программный комплекс для оптимизации режимов работы тепловых электростанций 9](#_Toc389395770)

[1.2.3 Программный комплекс «ТЭС-Эксперт» 10](#_Toc389395771)

[1.3 Обзор существующих алгоритмов оптимизации 11](#_Toc389395772)

[1.3.1 Адаптивный алгоритм случайного поиска с переменным шагом 11](#_Toc389395773)

[1.3.2 Комбинаторный эвристический алгоритм 12](#_Toc389395774)

[1.3.3 Прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска 13](#_Toc389395775)

[2 Конструкторский раздел 15](#_Toc389395776)

[2.1 Состав котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго 15](#_Toc389395777)

[2.2 Математическая модель функционирования котлоагрегатов 16](#_Toc389395778)

[2.2.1 Параметры, используемые в математической модели 16](#_Toc389395779)

[2.2.2 Входные управляемые переменные математической модели 17](#_Toc389395780)

[2.2.3 Выходные параметры математической модели 18](#_Toc389395781)

[2.2.4 Параметры математической модели, общие для всех котлоагрегатов 19](#_Toc389395782)

[2.2.5 Режимные карты котлоагрегатов котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго очереди «90 ата» 20](#_Toc389395783)

[2.2.6 Построение регрессионных полиномов 27](#_Toc389395784)

[2.2.7 Функциональные зависимости параметров котлоагрегатов очереди «90 ата» от паровой нагрузки 28](#_Toc389395785)

[2.2.8 Базовая математическая модель расхода топлива котлоагрегатом 33](#_Toc389395786)

[2.2.9 Целевые функции для выбранных критериев 38](#_Toc389395787)

[2.2.10 Ограничения 41](#_Toc389395788)

[2.2.11 Задача многокритериальной оптимизации 41](#_Toc389395789)

[2.3 Метод решения многокритериальной оптимизационной задачи 43](#_Toc389395790)

[2.3.1 Формирование множества возможных векторных критериев 43](#_Toc389395791)

[2.3.2 Выбор наилучшего векторного критерия 44](#_Toc389395792)

[2.4 Алгоритм решения многокритериальной оптимизационной задачи 52](#_Toc389395793)

[2.4.1 Алгоритм прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска 52](#_Toc389395794)

[2.4.2 Модификация алгоритма прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска 54](#_Toc389395795)

[3 Технологический раздел 61](#_Toc389395796)

[3.1 Выбор и обоснование технологии разработки программного комплекса 61](#_Toc389395797)

[3.1.1 Разработка модели 61](#_Toc389395798)

[3.1.2 Разработка интерфейса 62](#_Toc389395799)

[3.1.3 Используемые библиотеки 63](#_Toc389395800)

[3.1.4 Требование к вычислительной системе 64](#_Toc389395801)

[3.2 Диаграммы классов разработанного программного комплекса 65](#_Toc389395802)

[3.3 Тестирование программного комплекса 75](#_Toc389395803)

[4 Исследовательский раздел 77](#_Toc389395804)

[4.1 Проверка адекватности разработанного метода 77](#_Toc389395805)

[4.2 Эксперименты для возможных ситуаций на рынке электроэнергии 85](#_Toc389395806)

[Список литературы 94](#_Toc389395807)

# Глоссарий

# Введение

Проблема энергосбережения в настоящее время очень актуальна и представляет собой стратегическое направление деятельности, как отдельных предприятий, так и экономической политики государства в целом. Одним из основных важнейших направлений энергосбережения является оптимизация работы энергоагрегатов, а именно снижение затрат топливных и денежных ресурсов на производство энергии.

Необходимость оптимизации режимов работы энергетического оборудования обусловлена тем, что существует прямая конкуренция между энергокомпаниями-производителями, между энергокомпаниями и собственными генерирующими установками потребителей, между энергокомпаниями и генерирующими установками независимых производителей и др. [1].

# Аналитический раздел

## Постановка задачи

Целью данной работы является разработка метода многокритериальной оптимизации режимов работы котельного отделения электростанции и создание, на основе разработанного метода, программного продукта. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. анализ существующих оптимизационных продуктов и решений;
2. анализ существующих алгоритмов оптимизации;
3. выделение параметров и ограничений, необходимых для построения математической модели;
4. формулирование используемых критериев оптимизации;
5. формулирование целевой функции многокритериальной оптимизации;
6. выбор наиболее подходящего для решения поставленной задачи алгоритма оптимизации;
7. построение математической модели;
8. разработка метода многокритериальной оптимизации;
9. разработка программного продукта на основе данного метода;
10. исследование разработанного метода и сравнение полученных результатов с другими известными результатами.

**Входные данные:**

Входные данные для разработанного метода многокритериальной оптимизации представлены в таблице 1.1.

Таблица 1. Входные данные для разработанного метода оптимизации

|  |  |
| --- | --- |
| **Название** | **Описание** |
| Плановая паропроизводительность | Количество пара [тонн/час], которое должна обеспечивать очередь котлоагрегатов. |
| Цена на газ | Цена на газ на рынке электроэнергии, [руб./тыс.нм3]. |
| Цена на мазут | Цена на мазут на рынке электроэнергии, [руб./тонн]. |
| Коэффициенты относительной важности критериев оптимизации **(необязательный параметр)** | Задаются с помощью экспертного блока, могут принимать значения в диапазоне (0%; 100%). Показывают на сколько, в процентном соотношении, один из критериев оптимизации важнее остальных критериев. |

**Выходные данные:**

Выходные данные разработанного метода многокритериальной оптимизации представлены в таблице 1.2.

Таблица 1. Выходные данные разработанного метода оптимизации

|  |  |
| --- | --- |
| **Название** | **Описание** |
| Оптимальные состояния котлоагрегатов очереди | Состояния для каждого из котлоагрегатов очереди (Вкл./Выкл.), при которых очередь котлоагрегатов выполняет план по паропроизводительности, а критерии оптимизации имеют оптимальные значения. |
| Оптимальные паровые нагрузки | Распределение паровых нагрузок [тонн/час] между котлоагрегатами очереди, при котором очередь котлоагрегатов выполняет план по паропроизводительности, а критерии оптимизации имеют оптимальные значения. |
| Вид топлива для котлоагрегата | Виды топлива (Газ/Мазут) для котлоагрегатов очереди, при использовании которых очередь котлоагрегатов выполняет план по паропроизводительности, а критерии оптимизации имеют оптимальные значения. |

**Ограничения:**

Основные ограничения, учитываемые в разработанном методе многокритериальной оптимизации, описаны в таблице 1.3.

Таблица 1. Учитываемые ограничения

|  |  |
| --- | --- |
| **Название** | **Описание** |
| Суммарная паропроизводительность | Сумма паровых нагрузок [тонн/час] для каждого из котлоагрегатов очереди должна быть равна заданной плановой паропроизводительности [тонн/час]. |
| Диапазоны допустимых паровых нагрузок | Паровая нагрузка каждого из котлоагрегатов очереди [тонн/час] должна находиться в пределах допустимых паровых нагрузок для этого котлоагрегата [тонн/часmin; тонн/часmax]. |

**Критерии оптимизации:**

При решении поставленной задачи многокритериальной оптимизации было выделено несколько критериев. Выделенные критерии оптимизации приведены в таблице 1.4.

Таблица 1. Критерии оптимизации

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Название** | **Описание** | **Цель** |
| Расход газа | Расход газа [тыс.нм3/час] очередью котлоагрегатов, при котором выполняется план по паропроизводительности. | min |
| Расход мазута | Расход мазута [тонн/час] очередью котлоагрегатов, при котором выполняется план по паропроизводительности. | min |
| Финансовые затраты | Финансовые затраты [руб./час] на используемое очередью котлоагрегатов топливо, при которых выполняется план по паропроизводительности. | min |
| КПД | Коэффициент полезного действия очереди котлоагрегатов. | max |

**Целевая функция оптимизации:**

Обозначим критерии, перечисленные в таблице 1.4, как:

- Расход газа (K1);

- Расход мазута (К2);

- Финансовые затраты (К3);

- КПД (К4).

Тогда целевая функция оптимизации принимает следующий вид:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | |  | (1.) | |  |

**Требования, предъявляемые к программному продукту:**

1. Возможность ручной настройки значений входных параметров, описанных в таблице 1.1;
2. Автоматический расчет и определение значений выходных параметров, представленных в таблице 1.2;
3. Наглядное представление полученных результатов.

## Обзор существующих оптимизационных продуктов и решений

В ходе анализа предметной области были рассмотрены некоторые существующие оптимизационные продукты и решения. В данном разделе приводится их описание, а также преимущества и недостатки по сравнению с разработанным программным комплексом.

### Система моделирования и оптимизации режимов работы электростанции

В 2012 году в рамках проекта «Инновация 4 Generation» компанией ЗАО «Крок инкорпорейтед» была разработана и введена в эксплуатацию на ТЭЦ-20 Мосэнерго система моделирования и оптимизации режимов работы электростанции (далее «СМиОР ») [2].

Основной бизнес-процесс, входящий в состав «СМиОР», - «I4Plan». Он отвечает за определение планового состава оборудования, а также за оптимальное распределение нагрузок между котлоагрегатами.

При решении задачи оптимизации с помощью «СМиОР» создавалась имитационная модель (путем замены реальных объектов моделирующими элементами, которые имитируют определенные характеристики либо свойства этих объектов) ТЭЦ-20 Мосэнерго. Для создания такой модели была выбрана программа Thermoflex от компании Thermoflow (США). Компания Thermoflow является мировым лидером в разработке программного обеспечения для инженерных расчетов  в области  тепловой энергетики. Программа Thermoflex позволяет создавать с помощью базового набора элементов (котлов, турбин и т.д.) физическую модель, имитирующую процессы тепломассообмена, происходящие на тепловых электростанциях.

Построенная имитационная модель учитывалась для уточнения режимов и сведения материальных и тепловых балансов.

Для нахождения оптимального распределения нагрузок между оборудованием ТЭЦ выбран программный продукт ILOG ODM разработки компании IBM. Этот продукт представляет из себя гибкую платформу для планирования производства, предоставляет возможность сценарного анализа, имеет встроенный оптимизационный модуль IBM ILOG CPLEX, модуль визуализации IBM ILOG JViews.

IBM ILOG CPLEX – это программное средство оптимизации, специально разработанное для математического программирования. Формализует задачу оптимизации в математических выражениях.

IBM ILOG JViews - является системой развития визуализации и представления данных, основанной на java. Поддерживается широкий набор диаграмм - Гантта, графов, карт.

При решении задачи оптимизации с помощью «СМиОР» учитывались входные данные, аналогичные данным, описанным в таблице 1.1 (за исключением коэффициентов относительной важности критериев), а также ограничения, представленные в таблице 1.3. В качестве критерия оптимизации был выбран расход топлива котлоагрегатами.

Приведем достоинства и недостатки «СМиОР» по сравнению с разработанным программным комплексом.

**Достоинства:**

1. Использование имитационного моделирования;
2. Мощный встроенный оптимизационный модуль IBM ILOG CPLEX;
3. Функциональный модуль визуализации результатов IBM ILOG JViews;
4. Возможность расчета и сравнения нескольких сценариев.

**Недостатки:**

1. Использование дорогостоящих продуктов (IBM ILOG, Thermoflex);
2. Оптимизация по одному критерию (расход топлива);
3. Отсутствует учет информации об относительной важности критериев.

### Программный комплекс для оптимизации режимов работы тепловых электростанций

В статье [3] приводится описание и внешний вид программного комплекса для оптимизации краткосрочных режимов тепловых электрических станций. В качестве языка программирования используется C++, база данных сформирована на Microsoft SQL.

Авторы приводят подробное описание алгоритма оптимизации в [4].

Среди основных возможностей данного программного комплекса можно выделить следующие:

1. Автоматическое оптимальное распределение нагрузок между основным оборудованием электростанции;
2. Моделирование режимов работы станции при различных тепловых и электрических нагрузках с определением количества затрат топлива;
3. Хранение данных о режимах работы станции и часовом расходе топлива;
4. Анализ работы электростанции (просмотр информации о загрузке по отдельности каждого агрегата, станции в целом, количестве требуемого топлива и т.д.);
5. Формирование заявки для Администратора торговой системы.

Выделим достоинства и недостатки данного программного комплекса по сравнению с разработанным.

**Достоинства:**

1. Возможность динамической оптимизации и оптимизации на заданном оборудовании;
2. Использование базы данных для хранения информации о режимах работы станции и часовом расходе топлива;
3. Наличие ручного модуля распределения нагрузок персоналом (используется для проверки эффективности программного комплекса).

**Недостатки:**

1. Оптимизация по одному критерию (расход топлива);
2. Отсутствует учет информации об относительной важности критериев.

### Программный комплекс «ТЭС-Эксперт»

В статье [5] приведено описание программного комплекса «ТЭС-Эксперт», разработанного для оптимального ведения режима работы теплоэлектроцентрали.

Данный комплекс внедрен на Владимирской ТЭЦ-2 ОАО «ТГК-6», некоторые модули комплекса используются на Киришской ГРЭС ОАО «ОГК-6». «ТЭС-Эксперт» позволяет решать следующие основные задачи:

1. Определение минимальной и максимальной мощности ТЭЦ при заданном уровне тепловых нагрузок;
2. Определение оптимального состава и показателей режима работы оборудования ТЭЦ при заданных тепловых и электрических нагрузках с учетом исходного оперативного состояния оборудования;
3. Расчет топливной составляющей себестоимости и характеристики относительных приростов себестоимости электроэнергии;

Выделим достоинства и недостатки данного программного комплекса

по сравнению с разработанным.

**Достоинства:**

1. Оптимизация режимов работы как котлоагрегатов, так и турбоагрегатов;
2. Возможность планирования затрат тепла и электроэнергии на собственные нужды для каждого режима работы ТЭЦ.

**Недостатки:**

1. Оптимизация по одному критерию (расход топлива);
2. Отсутствует учет информации об относительной важности критериев.

Ни один из рассмотренных программных комплексов не предоставляет возможности оптимизации по нескольким критериям и не имеет экспертного блока для возможности учета коэффициентов относительной важности критериев, что является существенным недостатком по сравнению с разработанным программным комплексом.

## Обзор существующих алгоритмов оптимизации

В ходе решения многокритериальной оптимизационной задачи, описанной в разделе 1.1, на одном из шагов разработанного метода необходимо найти оптимальное значение целевой функции 1.1. Поиск оптимального значения целевой функции и значений переменных на этом шаге соответствует поиску оптимального распределения нагрузок между котлоагрегатами, работающими в заданном режиме.

Было исследовано несколько вариантов поиска оптимального значения целевой функции 1.1. Опишем рассмотренные методы оптимизации подробнее.

### Адаптивный алгоритм случайного поиска с переменным шагом

Адаптивный алгоритм случайного поиска [6] с переменным шагом изначально был разработан для задач без ограничений. В нем случайные выборки используются для определения направления поиска, а длина шага находится в соответствии с достигаемым улучшением целевой функции. Если две последовательные итерации дают улучшение целевой функции, величина шага увеличивается. Если же несколько последовательных итераций не дают улучшения, то величина шага уменьшается. Для возможности применения данного алгоритма к задачам с ограничениями, в него необходимо внести модификации. Приведем описание модифицированного алгоритма случайного поиска с переменным шагом [7]:

*Даны параметры af, as, M и начальная допустимая точка x0.*

*Начальная величина шага a полагается равной 1, m – число испытаний, не дающих улучшений, - принимается равным 0.*

**Шаг 1.** Получить случайный вектор d единичной длины и положить *x(1) = x(0) + ad.*

**Шаг 2.** Если x(1) – допустимая точка и f(x(1)) < f(x(0)), положить y=x(0) + as(x(1) – x(0)) и перейти к шагу 3. В противном случае принять *m = m+1* и перейти к шагу 4.

**Шаг 3.** Если y – допустимая точка и f(y) < f(x(0)), положить a = as\*a, x(1) = y и перейти к шагу 5. В противном случае перейти к шагу 1.

**Шаг 4.** Если m > M, положить a=afa, m = 0 и перейти к шагу 5. В противном случае сразу перейти к шагу 5.

**Шаг 5.** Перейти к шагу 1, если не выполнено условие окончания вычислений.

Численные эксперименты с некоторыми алгоритмами случайного поиска [8], в том числе и с вышеописанным, показывают, что данный алгоритм эффективен на начальной стадии вычислений для задач, содержащих не более 10 переменных. Для получения решения с большей точностью линейная (в среднем) скорость сходимости алгоритма оказывается недостаточной.

По имеющимся данным о вычислительных экспериментах [7] можно сделать вывод, что алгоритмы случайного поиска целесообразно использовать либо для задач небольшой размерности, либо как вспомогательный прием для определения «хорошей» начальной точки при применении более сложных методов оптимизации.

Противоположностью данного алгоритма является комбинаторный эвристический алгоритм, разработанный для решения задач проектирования машин и механизмов [7].

### Комбинаторный эвристический алгоритм

**Шаг 1.** Построить случайную допустимую начальную точку x0 и положить *Fмин = f(x0).* Для каждой переменной *I, i=1,2,…,N* выполнить следующую последовательность вычислений.

**Шаг 2.** Провести оптимизацию по i-й переменной, зафиксировав остальные.

**(а)** Выбрать случайным образом возможные значений i-й переменной для нахождения q дополнительных допустимых точек с лучшим значением целевой функции по сравнению с текущей базовой точкой. Если такие точки получить не удается, повторить шаг 2 для переменной I + 1.

**(б)** Определить наилучшее из q допустимых решений и положить значение целевой функции равным Tмин.

**(в)** Произвести «упреждающий» поиск.

**(1)** Для каждого из q допустимых решений, найденных на шаге 2(а), провести случайный выбор одного из q возможных значений переменной (i+1) для определения допустимого значения этой переменной, дающего лучшее значение целевой функции по сравнению с T мин.

**(2)** Выбрать наилучшую из q допустимых точек. Зафиксировать значение переменной i, соответствующее этой точке, как оптимальное.

**(г)** Если I = N, перейти к шагу 3. В противном случае выполнить шаг 2 для переменной (I+1).

**Шаг 3.** Провести случайный поиск для определения наилучшего значений переменной N при фиксированных значениях других переменных, соответствующих текущим базовым точкам. Найденную точку принять за новую базовую точку, а значение целевой функции в ней – за новое значение *Fмин.*

**Шаг 4.** Перейти к шагу 2 с I = 1, если не выполнены условия окончания вычислений.

В качестве критерия окончания вычислений можно использовать, например, тот факт, что целевая функция не улучшается. Авторы алгоритма утверждают, что q – число «упреждающих» точек, должно лежать между 3 и 5 [7].

Данный алгоритм представляется более эффективным, чем алгоритм случайного поиска, описанный в разделе 1.3.1, так как он минимизирует обращение к одновременным выборкам [7].

Разработчики данного алгоритма приводят данные о его применении к различным задачам проектирования машин и механизмов. В частности, даются примеры разработки привода с плавно регулируемой скоростью, записывающего устройства, сдвоенной кулисной передачи и зубчатой передачи с двойным зацеплением [9] [10].

### Прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска

При использовании данного метода пользователь задает количество серий Q и количество точек P в каждой из них. Наилучшая точка в каждой серии используется как начальная точка в следующей серии, точки которой выбираются из интервала меньшей величины [7].

Данный метод является более эффективным, чем методы, описанные в разделах 1.3.1 и 1.3.2, так как позволяет использовать накопленную информацию [7].

Также, согласно проведенному тестированию [11], было выявлено, что наиболее эффективным для решения многоэкстремальных задач является метод прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска [12]. Остальные рассмотренные методы ориентированы на поиск локального экстремума и являются неэффективными для решения задач, подобных задаче, поставленной в разделе 1.1.

Работоспособность данного метода была исследована [11] на примере широко распространенной тестовой функции от двух переменных, имитирующей сильную «овражность», - функции Розенброка [13]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

По результатам проведенных испытаний [11], погрешность отыскания оптимума по функционалу *f* с помощью метода прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска составила *3.4\*10-5* и по переменным *x1* и *x2* – *5\*10-3* и *1.1\*10-2*, соответственно, т.е. данный метод оптимизации оказался весьма эффективным.

В соответствии с этим, для нахождения оптимального решения целевой функции 1.1 был выбран метод прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска. Подробное описание данного метода, а также его модификация для возможности применения к поставленной задаче приводятся в разделе 2.4.

# Конструкторский раздел

В данном разделе приводится состав котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго, описывается базовая математическая модель расхода топлива котлоагрегатами. Приводится модификация математической модели в соответствии с требованиями поставленной задачи и конкретными параметрами, относящимися к условиям функционирования ТЭЦ-20 Мосэнерго. Выполняется построение целевых функций для сформулированных в разделе 1.1 критериев оптимизации, а также построение общей целевой функции, описывающей поставленную многокритериальную оптимизационную задачу.

Приводится описание метода, предлагаемого для решения поставленной задачи, а также алгоритма, реализующего данный метод.

Описывается структура разработанного программного продукта.

## Состав котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго

Котельное отделение ТЭЦ-20 Мосэнерго состоит из двух независимых очередей котлоагрегатов:

1. Очередь «90 ата», в которой котлоагрегаты работают при давлении 90 атм.;
2. Очередь «130 ата», в которой котлоагрегаты работают при давлении 130 атм.;

В виду сложности математической модели и большого количества расчетов, а также независимости приведенных выше очередей котлоагрегатов, в данной работе рассматривается только очередь «90 ата».

Очередь «90 ата» состоит из 6 котлоагрегатов, условно обозначаемых: K1, K2, K3, K4, K5, K6. Каждый из них может работать как на газе, так и на мазуте, а также на любой комбинации газа и мазута.

## Математическая модель функционирования котлоагрегатов

В данном разделе выделяются параметры, необходимые для построения математической модели функционирования котлоагрегатов, определяются входные управляемые переменные математической модели и выходные параметры, получаемые после ее расчета. Выполняется построение математической модели в соответствии с поставленной задачей.

### Параметры, используемые в математической модели

Для построения математической модели функционирования котлоагрегатов и проведения расчетов, необходимо учесть параметры [11], представленные в таблице 2.1.

Данные параметры были взяты из [11], где рассматривалась модель функционирования Могилевской ТЭЦ-2. Построенная в [11] математическая модель была успешно внедрена на Могилевской ТЭЦ-2 [1], которая является типичным энергетическим предприятием, в состав которого входят турбинное и котельное отделение. Это позволяет использовать описанные параметры для построения математической модели функционирования и других ТЭЦ, в том числе котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго, рассматриваемого в данной работе.

Таблица 2. Параметры, используемые в математической модели

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Название** | **Обозначение** | **Единица измерения** |
| **Вид, марка, характеристики сжигаемого топлива** | | |
| Низшая теплота сгорания |  | ккал/кг (кДж/кг);  ккал/м3 (кДж/м3) |
| Влажность на рабочую массу |  | % |
| Температура мазута, подаваемого в топку котла |  | oC |
| Цена единицы топлива |  | у.е./т;  у.е./тыс.м3 |
| **Параметры, определяемые при тепловом расчете котельных агрегатов** | | |
| Теоретический объем сухого воздуха, необходимый для полного сгорания топлива |  | н.м3/кг |
| Нормативная температура холодного воздуха |  | oC |
| Нормативные присосы воздуха в газовый тракт |  |  |
| Нормативные присосы воздуха в топку |  |  |
| Нормативные потери тепла корпусом котла в окружающую среду при номинальной часовой паропроизводительности |  |  |
| Теплосодержание (энтальпия) перегретого пара |  | ккал/кг (кДж/кг) |
| Теплосодержание (энтальпия) питательной воды |  | ккал/кг (кДж/кг) |
| **Нормативные характеристики и параметры, определяемые при режимно-наладочных испытаниях энергоагрегатов** | | |
| Теплосодержания (энтальпия) котловой воды |  | ккал/кг (кДж/кг) |
| Температура воздуха после воздухоподогревателей |  | oC |
| Температура уходящих газов |  | oC |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  |
| Потери тепла с химическим недожогом топлива |  | % |
| **Корректирующие параметры, замеряемые в процессе эксплуатации при текущем режиме работы** | | |
| Теплосодержания (энтальпия) котловой воды |  | ккал/кг (кДж/кг) |
| Температура воздуха после воздухоподогревателей |  | oC |
| Температура уходящих газов |  | oC |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  |
| Потери тепла с химическим недожогом топлива |  | % |
| Присосы воздуха в газовый тракт |  |  |
| Присосы воздуха в топку |  |  |
| Нормативная температура холодного воздуха |  | oC |

### Входные управляемые переменные математической модели

В поставленной задаче рассматривается группа котлоагрегатов, работающих на газе или мазуте. При этом каждый из котлоагрегатов, входящий в состав группы, может работать только на одном из видов топлива. В поставленной задаче не рассматривается возможность работы котлоагрегата на смешанном топливе.

Исходя выше сказанного, выделим входные управляемые переменные для математической модели. Опишем их в таблице 2.2. Для этого скорректируем список управляемых переменных, используемых в [11], в соответствии с требованиями поставленной задачи.

Таблица 2. Входные управляемые переменные математической модели

|  |  |
| --- | --- |
| **Название** | **Описание** |
| Состав загружаемых котлоагрегатов | Каждый из котлоагрегатов может находиться в одном из трех состояний:   1. Выключен (0); 2. Включен и работает на газе (Г); 3. Включен и работает на мазуте (М). |
| Паровая нагрузка для каждого котлоагрегата, | Паровая нагрузка котла определяется по режимным картам котла и может принимать значение в пределах от некоторого минимального до некоторого максимального значения |

### Выходные параметры математической модели

Выделим выходные параметры, получаемые при расчете построенной математической модели. Данные параметры представлены ниже, в таблице 2.3. Выделенные параметры позволяют получить оптимальное решение построенной целевой функции, представленной формулой 1.1 при учете критериев, описанных в разделе 1.1.

Таблица 2. Выходные параметры математической модели

|  |  |
| --- | --- |
| **Название** | **Описание** |
| Оптимальный состав загружаемых котлоагрегатов | Одно из трех состояний:   1. Выключен (0); 2. Включен и работает на газе (Г); 3. Включен и работает на мазуте (М),   для каждого из котлоагрегатов. |
| Оптимальная паровая нагрузка для каждого котлоагрегата, | Значение паровой нагрузки для каждого из котлоагрегатов в пределах допустимых значений, взятых из режимных карт котлов. |

### Параметры математической модели, общие для всех котлоагрегатов

В таблице 2.4 приведены конкретные значения параметров, используемых в математической модели, которые являются общими для всех котлоагрегатов очереди «90 ата» котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго.

Данные значения являются реальными, полученными в результате проведения режимно-наладочных испытаний на ТЭЦ-20 Мосэнерго.

Таблица 2. Параметры, общие для всех котлоагрегатов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Единицы измерения** | **Значение** |
| Потери тепла с химическим недожогом топлива |  | % | 0 |
| Потери тепла от механической неполноты сгорания топлива |  | % | 0 |
| Низшая теплота сгорания газа |  | ккал/нм3 | 8440 |
| Низшая теплота сгорания мазута |  | ккал/кг | 9300 |
| Влажность топлива на рабочую массу (для газа) |  | % | 0 |
| Влажность топлива на рабочую массу (для мазута) |  | % | 15% |
| Объемная теплоемкость воздуха |  | ккал/(м3·°С) | 0*.*317 |
| Теоритически объем сухого воздуха, необходимый для полного сгорания топлива |  | нм3/кг | 10*.*42 |
| Температура воздуха после воздухоподогревателей (для газа) |  | °С | 30 |
| Температура воздуха после воздухоподогревателей (для мазута) |  | °С | 80 |
| Температура поступающего в топку котла мазута |  | °С | 110 |
| Удельный расход пара на распыливание мазута |  | кг пара / кг мазута | 0*.*02 |
| Теплосодержание пара, поступающего на распыливание |  | ккал/кг | 699*.*1 |
| Теплосодержание пара при давлении и температуре уходящих газов |  | ккал/кг | 600 |
| Температура воздуха на всосе дутьевого вентилятора |  | °С | 30 |
| Поправка на изменение температуры воздуха в вентиляторах за счет его сжатия |  |  | 0 |
| Норма присосов в топку |  |  | 0,05 |
| Норма присосов в газовый тракт (при ) |  |  | 0,1 |
| Норма присосов в газовый тракт (при ) |  |  | 0,25 |
| Теплосодержание (энтальпия) перегретого пара |  | ккал/кг | 814,97 |
| Теплосодержание (энтальпия) питательной воды |  | ккал/кг | 220 |
| Теплосодержание (энтальпия) котловой воды |  | ккал/кг | 334,2 |

### Режимные карты котлоагрегатов котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго очереди «90 ата»

В данном разделе приведены конкретные значения параметров, используемых в математической модели, которые отличаются для каждого из котлоагрегатов. Эти значения получены по режимным картам котлоагрегатов очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго [14], составлявшимся по результатам режимно-наладочных испытаний котлоагрегатов.

**Котлоагрегат K-1**

В таблице 2.5 приведена режимная карта котлоагрегата K-1 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

Таблица 2. Режимная карта К-1 при работе на природном газе

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 66,08 | 66,05 | 66,1 | 66,1 | 66,15 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,19 | 0,97 | 0,82 | 0,72 | 0,63 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 150 | 152 | 154 | 155 | 156 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,21 | 1,21 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,12 | 1,12 | 1,12 | 1,12 | 1,12 |

В таблице 2.6 приведена режимная карта котлоагрегата K-1 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

Таблица 2. Режимная карта К-1 при работе на мазуте

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | Ы8,38 | 77,94 | 77,64 | 77,55 | 77,67 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,19 | 0,97 | 0,83 | 0,71 | 0,63 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 175 | 176 | 178 | 181 | 186 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,53 | 1,43 | 1,37 | 1,33 | 1,30 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,39 | 1,31 | 1,25 | 1,22 | 1,2 |

**Котлоагрегат K-2**

В таблице 2.7 приведена режимная карта котлоагрегата K-2 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

Таблица 2. Режимная карта К-2 при работе на природном газе

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 55,58 | 55,52 | 55,45 | 55,52 | 55,62 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,19 | 0,97 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 136 | 138 | 140 | 142 | 145 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,30 | 1,22 | 1,20 | 1,18 | 1,17 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,15 | 1,12 | 1,11 | 1,1 | 1,09 |

В таблице 2.8 приведена режимная карта котлоагрегата K-2 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

Таблица 2. Режимная карта К-2 при работе на мазуте

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | Ы8,7 | 88,03 | 77,85 | 77,69 | 77,63 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,13 | 0,93 | 0,78 | 0,68 | 0,6 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 170 | 172 | 176 | 179 | 181 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,62 | 1,46 | 1,38 | 1,32 | 1,29 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,48 | 1,34 | 1,27 | 1,21 | 1,19 |

**Котлоагрегат K-3**

В таблице 2.9 приведена режимная карта котлоагрегата K-3 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

Таблица 2. Режимная карта К-3 при работе на природном газе

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 66,74 | 66,18 | 55,95 | 55,84 | 55,74 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,19 | 1,07 | 0,95 | 0,87 | 0,8 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 150 | 149 | 149 | 149 | 148 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,39 | 1,29 | 1,24 | 1,22 | 1,21 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,21 | 1,12 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |

В таблице 2.10 приведена режимная карта котлоагрегата K-3 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

Таблица 2. Режимная карта К-3 при работе на мазуте

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 9,37 | 8,91 | 8,42 | 8,21 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 0,77 | 0,65 | 0,57 | 0,5 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 180 | 182 | 184 | 185 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,88 | 1,75 | 1,62 | 1,56 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,74 | 1,62 | 1,5 | 1,45 |

**Котлоагрегат K-4**

В таблице 2.11 приведена режимная карта котлоагрегата K-4 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

Таблица 2. Режимная карта К-4 при работе на природном газе

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 5,57 | 5,66 | 5,7 | 5,75 | 5,79 | 5,84 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1 | 0,87 | 0,77 | 0,69 | 0,62 | 0,57 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 149 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,17 | 1,16 | 1,15 | 1,15 | 1,14 | 1,14 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 |

В таблице 2.12 приведена режимная карта котлоагрегата K-4 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

Таблица 2. Режимная карта К-4 при работе на мазуте

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 7,71 | 7,72 | 7,73 | 7,78 | 7,84 | 7,94 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 0,97 | 0,84 | 0,74 | 0,67 | 0,6 | 0,55 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 175 | 176 | 177 | 178 | 180 | 182 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,4 | 1,39 | 1,39 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |

**Котлоагрегат K-5**

В таблице 2.13 приведена режимная карта котлоагрегата K-5 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

Таблица 2. Режимная карта К-5 при работе на природном газе

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 5,25 | 5,23 | 5,2 | 5,23 | 5,33 | 5,42 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,01 | 0,87 | 0,77 | 0,57 | 0,57 | 0,57 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 138 | 140 | 141 | 142 | 143 | 145 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,17 | 1,14 | 1,13 | 1,12 | 1,12 | 1,12 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,1 | 1,07 | 1,06 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |

В таблице 2.14 приведена режимная карта котлоагрегата K-5 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

Таблица 2. Режимная карта К-5 при работе на мазуте

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 7,41 | 6,79 | 6,7 | 6,5 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 0,77 | 0,69 | 0,62 | 0,57 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 164 | 165 | 162 | 162 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,54 | 1,43 | 1,43 | 1,42 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,3 | 1,19 | 1,19 | 1,19 |

**Котлоагрегат K-6**

В таблице 2.15 приведена режимная карта котлоагрегата K-6 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

Таблица 2. Режимная карта К-6 при работе на природном газе

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 5,62 | 5,66 | 5,69 | 5,73 | 5,78 | 5,8 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,01 | 0,87 | 0,77 | 0,57 | 0,57 | 0,57 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 142 | 146 | 149 | 151 | 153 | 155 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,20 | 1,17 | 1,14 | 1,13 | 1,12 | 1,12 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1.13 | 1,12 | 1,11 | 1,09 | 1,09 | 1,09 |

В таблице 2.16 приведена режимная карта котлоагрегата K-6 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

Таблица 2. Режимная карта К-6 при работе на мазуте

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 8,47 | 8,1 | 7,56 | 7,32 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 0,74 | 0,67 | 0,6 | 0,55 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 183 | 184 | 184 | 185 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,61 | 1,52 | 1,4 | 1,34 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,52 | 1,43 | 1,32 | 1,26 |

### Построение регрессионных полиномов

В [11] рассматриваются условия функционирования Могилевской ТЭЦ-2. Для выделенных параметров, описанных в разделе 2.2.5, в [11] методами регрессионного анализа были установлены их функциональные зависимости от текущей паровой нагрузки котлоагрегатов. В ходе этого анализа было выявлено, что наиболее удовлетворительным видом функциональных зависимостей являются регрессионные полиномы третьей степени [11]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – паровая нагрузка котлоагрегата, *i* = 1..*n*, где *n* – количество наблюдений.

Могилевская ТЭЦ-2 является типичным энергетическим предприятием, - это позволяет считать полученные функциональные зависимости, установленные для Могилевской ТЭЦ-2 справедливыми также и для других ТЭЦ.

Опишем общий алгоритм построения регрессионных полиномов третьей степени.

В соответствии с методом наименьших квадратов [15], для определения параметров полинома третьей степени (2.1) строится следующая система линейных алгебраических уравнений:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Обозначим:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где n – количество наблюдений.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

регрессионная матрица размером n \* k, где k – количество оцениваемых параметров. В данном случае, k = 4.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

вектор параметров.

Исходя из этого, система линейных алгебраических уравнений (2.2) принимает следующий вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Далее, при подстановке исходных данных из наблюдений, вычисляются коэффициенты матриц и . А затем, решая полученную систему (2.6), находим коэффициенты регрессионного полинома третьей степени .

### Функциональные зависимости параметров котлоагрегатов очереди «90 ата» от паровой нагрузки

Построим регрессионные полиномы третьей степени для параметров котлоагрегатов очереди «90 ата». Необходимо получить функциональные зависимости от паровой нагрузки для следующих параметров:

1. потери тепла с уходящими газами ,
2. потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения ,
3. температура уходящих газов ,
4. коэффициент избытка воздуха в уходящих газах ,
5. коэффициент избытка воздуха в режимном сечении .

Для каждого из перечисленных выше параметров решим систему линейных алгебраических уравнений, описанную формулой (2.2), используя значения, полученные по режимным картам котлоагрегатов [14], приведенным в разделе 2.2.5.

В таблицах 2.17, 2.18, 2.19, 2.20, 2.21 ниже приведены построенные функциональные зависимости – регрессионные полиномы третьей степени – параметров котлоагрегатов от паровой нагрузки при использовании различных видов топлива.

Таблица 2. Функциональные зависимости потерь тепла с уходящими газами () от паровой нагрузки ()

|  |  |
| --- | --- |
| **Топливо - Газ** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |
| **Топливо - Мазут** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |

Таблица 2. Функциональные зависимости потерь тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения () от паровой нагрузки ()

|  |  |
| --- | --- |
| **Топливо - Газ** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |
| **Топливо - Мазут** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |

Таблица 2. Функциональные зависимости температуры уходящих газов () от паровой нагрузки ()

|  |  |
| --- | --- |
| **Топливо - Газ** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |
| **Топливо - Мазут** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |

Таблица 2. Функциональные зависимости коэффициентов избытка воздуха в уходящих газах () от паровой нагрузки ()

|  |  |
| --- | --- |
| **Топливо - Газ** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |
| **Топливо - Мазут** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |

Таблица 2. Функциональные зависимости коэффициентов избытка воздуха режимном сечении () от паровой нагрузки ()

|  |  |
| --- | --- |
| **Топливо - Газ** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |
| **Топливо - Мазут** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |

### Базовая математическая модель расхода топлива котлоагрегатом

В данном разделе приводится базовая математическая модель расхода топлива котлоагрегата, и подробно описываются зависимости между входящими в математическую модель параметрами.

Для наглядности, модель расхода топлива котлоагрегатом удобно представить в виде иерархической структуры – дерева, узлами которого являются энергетические характеристики и исходные данные, требуемые для расчетов.

Данная структура приведена ниже, на рисунке 2.1.

Рис. 2. Структура модели расхода топлива котлоагрегатом

Базовая модель расхода топлива котлоагрегатом строится на основе типовых методик расчета энергетических характеристик котлоагрегатов [11], [16], [17], [18].

Значения параметров и характеристик, встречающихся в математической модели расхода топлива котлоагрегатом, а также их единицы измерения описаны в таблице 2.4 и разделе 2.2.5 выше.

Целевая функция расхода топлива представляется в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – количество потребляемого топлива [т.н.т./час]. – тепловая нагрузка, которую необходимо обеспечить (заданная, плановая величина) [Гкал/час]. – располагаемое тепло [ккал/час]. – КПД котла брутто [%].

Располагаемое тепло описывается соотношением:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – низшая теплота сгорания топлива (для газа или мазута, соответственно). - тепло, вносимое в котел воздухом. - тепло, вносимое в котел мазутом. - тепло, внесенное в топку форсуночным паром.

Тепло, вносимое в котел воздухом , вычисляется по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – объемная теплоемкость воздуха, – теоретический объем сухого воздуха, необходимый для полного сгорания топлива. - коэффициент избытка воздуха на входе в воздухоподогреватель, - температура воздуха после воздухоподогревателей, - температура воздуха перед воздухоподогревателями.

Коэффициент избытка воздуха на входе в воздухоподогреватель , вычисляется по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – коэффициент избытка воздуха в режимном сечении, – нормативная величина присосов воздуха в топку, – нормативная величина присосов воздуха в газовый тракт.

Нормативная величина присосов воздуха в топку описывается соотношением:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – норма присосов в топку, – номинальная паропроизводительность данного котла, – паровая нагрузка.

Нормативная величина присосов воздуха в газовый тракт, определяется как:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – норма присосов в газовый тракт.

Температура воздуха перед воздухоподогревателями , рассчитывается из следующего соотношения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – температура холодного воздуха на всосе дутьевого вентилятора, – поправка на изменение температуры воздуха в дутьевых вентиляторах за счет его сжатия.

Тепло, вносимое в котел мазутом определяется зависимостью:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где - удельная теплоемкость мазута при температуре его поступления в топку, - температура поступающего в топку котла мазута, нагретого вне его.

Тепло , внесенное в топку форсуночным паром, вычисляется по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где - удельный расход пара на распыливание 1 кг мазута, -энтальпия пара, поступающего на распыливание мазута, - энтальпия пара при давлении и температуре уходящих газов.

КПД брутто вычисляется из соотношения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где - потери тепла с уходящими газами, - потери тепла c химическим недожогом топлива, – потери тепла от механической неполноты сгорания топлива, - потеря тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения наружными поверхностями.

Потери тепла с уходящими газами вычисляются по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где - коэффициенты, зависящие от сорта и приведенной влажности топлива; – температура уходящих газов; - поправочный коэффициент, учитывающий внесенное в топку котла тепло с паром, подогретым воздухом и топливом.

При использовании котлом мазута, справедливы соотношения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |
|  | (.) |

где – влажность топлива на рабочую массу.

При использовании газа в качестве топлива, принимают , , .

Коэффициент определяется зависимостью:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах описывается соотношением:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Поправочный коэффициент учитывает внесенное в топку котла тепло с паром, подогретым воздухом и топливом:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Величина определяется соотношением:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где - нормативные потери тепла котлом (корпусом котла) в окружающую среду при номинальной часовой паропроизводительности.

Совокупность описанных выше выражений, (2.7) - (2.23), представляет собой базовую математическую модель расхода топлива котлоагрегатом.

### Целевые функции для выбранных критериев

Сформулируем целевые функции для описанных в разделе 1.1 критериев оптимизации поставленной задачи, с учетом математической модели расхода топлива, описанной в разделе 2.2.8.

**Критерий расхода газа**

Рассмотрим формулу критерия расхода условного топлива, приведенную в [11]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где , – топливные эквиваленты, показывающие какому количеству условного топлива равноценна единица массы (или объема) мазута и газа соответственно, – вектор паропроизводительностей n котлоагрегатов, – вектор, характеризующий доли использования разных видов топлива всеми агрегатами.

С учетом того, что мы рассматриваем n котлов, работающих только на газе, формулу для критерия расхода газа представим в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – расход газа для обеспечения текущей паропроизводительности *i*-ым парогенератором;

– вектор паропроизводительностей n котлоагрегатов, работающих на газе.

**Критерий расхода мазута**

Для построения формулы критерия расхода мазута воспользуемся теми же рассуждениями, что и при построении формулы критерия расхода газа. В результате критерий расхода мазута представим в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – расход газа для обеспечения текущей паропроизводительности *i-*ым парогенератором;

– вектор паропроизводительностей *m* котлоагрегатов, работающих на мазуте.

**Критерий финансовых затрат на используемое топливо**

Рассмотрим формулу критерия финансовых затрат на используемое комбинированное топливо, приведенную в [11]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где , – цены на жидкое топливо и газ соответственно.

При рассмотрении n котлов, работающих только на газе, с учетом приведенной выше формулы (2.27), формулу для финансовых затрат на газ представим в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – цена на газ; – вектор паропроизводительностей *n* котлоагрегатов, работающих на газе. – расход газа для обеспечения паропроизводительности .

Для m котлов, работающих только на мазуте, формулу финансовых затрат на мазут представим в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – цена на мазут; – вектор паропроизводительностей *m* котлоагрегатов, работающих на жидком топливе (мазуте). – расход мазута для обеспечения паропроизводительности .

Таким образом, общую формулу критерия финансовых затрат на используемое топливо (газ + мазут) можно представить в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

**Критерий КПД группы работающих котлоагрегатов**

КПД группы котлоагрегатов будем вычислять как средневзвешенную КПД всех котлов.

Рассмотрим формулу, описывающую КПД группы котлоагрегатов, работающих на комбинированном топливе, приведенную в [11]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где , – КПД i-го агрегата при работе на мазуте и на газе, соответственно, - теплопроизводительность *i*-го агрегата.

Исходя из приведенной выше формулы (2.31), построим формулу, применимую для котлоагрегатов, работающих только на газе. Она примет следующий вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где = – вектор паропроизводительностей n котлоагрегатов, работающих на газе; – КПД полезного действия i-го котлоагрегата, работающего на газе; – теплопроизводительность i-го агрегата, работающего на газе.

Сформулируем то же самое для котлоагрегатов, использующих только жидкое топливо (мазут):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где = – вектор паропроизводительностей n котлоагрегатов, работающих на мазуте; – КПД полезного действия i-го котлоагрегата, работающего на мазуте; – теплопроизводительность i-го агрегата, работающего на мазуте.

Приведем формулу для КПД группы работающих агрегатов (использующих и газ и мазут), в соответствии с формулами (2.32), (2.33). Она принимает следующий вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Таким образом, в разделе 2.2.9 были сформулированы формулы для критериев, описанных в разделе 1.1.

### Ограничения

При постановке задачи оптимизации режимов работы очереди котлоагрегатов таблице 1.3 были рассмотрены ограничения, которые необходимо учитывать при решении. Приведем для них математические формулы [11].

**Суммарная паропроизводительность группы котлоагрегатов:**

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – паропроизводительность *i*-го котлоагрегата; – суммарная паропроизводительность группы работающих котлоагрегатов.

**Диапазоны рабочей производительности для каждого из котлоагрегатов:**

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – минимально возможная паропроизводительность *i*-го котлоагрегата; – максимально возможная паропроизводительность *i*-го котлоагрегата; – текущая паропроизводительность *i*-го котлоагрегата.

### Задача многокритериальной оптимизации

С учетом критериев (2.25), (2.26), (2.30), (2.34) и ограничений (2.35), (2.36) задача оптимизации режимов работы очереди котлоагрегатов принимает следующий вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

При совокупности следующих ограничений:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Составим общую целевую функцию F, на основе описанных выше критериев, которую необходимо будет минимизировать. Для этого критерий КПД группы котлоагрегатов включим в эту функцию со знаком минус, сведя таким образом операцию максимизации к операции минимизации:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

В процессе оптимизации необходимо определить n-1 переменных - . Переменная определяется из соотношения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

## Метод решения многокритериальной оптимизационной задачи

В данном разделе описывается разработанный метод для проведения многокритериальной оптимизации очереди «90 ата» котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго с выбором наиболее подходящего состава энергоагрегатов, который является комбинацией методов, представленных в [11], [19] c некоторыми дополнениями и ограничениями, исходя из постановки задачи в разделе 1.1.

Предлагаемый метод состоит из двух шагов, разбивающихся, в свою очередь, на более мелкие:

1. Формирование множества возможных векторных критериев;
2. Выбор наилучшего векторного критерия из множества возможных.

Рассмотрим данные шаги подробнее.

### Формирование множества возможных векторных критериев

Важной проблемой [11] является выбор оптимального состава энергоагрегатов. Возможны ситуации [11], когда для улучшения целевой функции целесообразно нагружать не все работоспособные в данный момент котлоагрегаты.

Рассмотрим группу, состоящую из *n* котлоагрегатов, каждый из которых может работать либо на газе, либо на жидком топливе (мазуте).

Каждый из котлов может находиться в одном из трех состояний (работает на газе / работает на мазуте / не работает). Таким образом, всего получим *3n* вариантов различных состояний для группы котлоагрегатов.

Необходимо перебрать все возможные составы группы котлоагрегатов и варианты использования ими различного топлива и сформировать векторные критерии для каждого из них.

При формировании очередной комбинации нагружаемых агрегатов необходимо проверять [11] выполнение условия обеспечения заданной суммарной паропроизводительности:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

После построения комбинации котлоагрегатов, при условии выполнения ограничения (2.41), необходимо провести «локальную» многокритериальную оптимизацию целевой функции, описываемой формулой (2.39), при совокупности ограничений (2.38).

Вследствие этого будут получены значения для критериев (2.25), (2.26), (2.30), (2.34), из которых составляется векторный критерий на текущем шаге *i*:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

После перебора всех возможных комбинаций и формирования векторных критериев для них, получим множество векторных критериев:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где *n* – количество комбинаций нагружаемых котлоагрегатов, удовлетворяющих ограничению (2.35).

### Выбор наилучшего векторного критерия

Выбор наиболее подходящего векторного критерия из множества (2.43) делится на 2 шага:

1. Построение множества Парето и его последовательное сужение [19].
2. Применение метода целевого программирования [20], [21] для выбора оптимального векторного критерия.

**Построение множества Парето**

Перед описанием алгоритма построения множества Парето необходимо описать бинарные отношения для произвольных векторов , пространства , использующиеся при построении множества Парето.

Эти отношения описываются следующими формулами:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |
|  | (.) |

Выполнение соотношения обозначает, что каждая компонента вектора *a* больше либо равна соответствующей компоненты вектора *b*, причем хотя бы одна компонента первого вектора строго больше соответствующей компоненты второго вектора.

Опишем алгоритм построения множества парето-оптимальных векторов. Предполагается, что множество возможных векторов *Y* состоит из конечного числа *n* элементов и имеет вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Алгоритм построения множества Парето состоит из следующих шагов:

**Шаг 1.** Положить *P(Y) = Y, i=1, j=2*. При этом образуется «текущее» множество парето-оптимальных векторов, которое в начале работы алгоритма совпадает с множеством *Y*, а при завершении алгоритма будет составлять искомое множество парето-оптимальных векторов.

**Шаг 2.** Проверить выполнение соотношения . Если оно выполняется, - переходим к шагу 3, иначе – переходим к шагу 5.

**Шаг 3.** Удалить из текущего множества векторов P(Y) вектор , так как он не является парето-оптимальным. Перейти к шагу 4.

**Шаг 4.** Проверить выполнение неравенства *j<n.* Если оно выполняется, - то принять *j = j +1* и перейти к шагу 2, иначе, - перейти к шагу 7.

**Шаг 5.** Проверить выполнение отношения . Если оно выполняется, - перейти к шагу 6, иначе, - перейти к шагу 4.

**Шаг 6.** Удалить из текущего множества векторов *P(Y)* вектор и перейти к шагу 7.

**Шаг 7.** Проверить выполнение неравенства *i<n–1*. Если оно выполняется, - принять *i = i+1, j = i+1,* перейти к шагу 2. Если неравенство не выполняется, - завершить работу алгоритма.

Блок-схема описанного выше алгоритма представлена ниже, на рисунке 2.2.



Рис. 2. Алгоритм построения множества парето-оптимальных векторов

**Относительная важность критериев**

Введем определение понятия «*i-ый* критерий *важнее* *j-го* критерия».

Пусть Будем говорить, что *i-й* критерий важнее *j-го* критерия с заданными положительными параметрами , , если для всех векторов , для которых выполняются соотношения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |
|  | (.) |

имеет место соотношение

То есть, для лица, принимающего решение (ЛПР), *i-й* критерий важнее *j-го*, если всякий раз при выборе из пары векторов, ЛПР готово пожертвовать определенным количеством по менее важному *j-у* критерию, ради получения дополнительного количества по более важному *i-у* критерию при условии сохранения всех остальных значений критериев.

Теперь можем ввести понятие относительной важности для пары критериев.

Пусть и i-й критерий важнее j-го критерия с положительными параметрами . В этом случае, коэффициентом относительной важности для указанной пары критериев называется число:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Коэффициент показывает долю потери по менее важному критерию, на которую согласно пойти ЛПР, в сравнении с суммой потери и прибавки по более важному критерию.

Если коэффициент близок к единице, то это означает, что ЛПР за относительно небольшую прибавку по более важному i-у критерию готово платить относительно большой потерей по менее важному j-у критерию.

Если коэффициент находится вблизи 0, - это означает, что ЛПР согласно пойти на потери по менее важному критерию, только при условии получения существенной прибавки по более важному критерию.

Если коэффициент = 0.5, - то ЛПР готово согласиться на некоторую прибавку по более важному критерию за счет потери по менее важному критерию, лишь при условии, что величина прибавки в точности совпадает с величиной потери.

**Последовательное сужение множества Парето**

Для применения метода последовательного сужения множества, необходимо сформировать коэффициенты относительной важности *i*-го критерия по сравнению с *j*-ым критерием, описанные формулой (2.49).

Эти действия должно осуществлять ЛПР. Реализованное программное обеспечение (ПО) для решения поставленной задачи оптимизации имеет экспертный блок, позволяющий задавать необходимые коэффициенты. Таким образом, в описанном процессе, в качестве ЛПР выступает эксперт, непосредственно работающий с разработанным ПО.

ЛПР должно быть заинтересовано в максимизации каждой из функций , участвующих в задаче. Если какой-то из критериев для ЛПР желательно не максимизировать, а минимизировать, то его в математическую модель следует включить со знаком минус [19]. Этот подход позволяет свести операцию минимизации к операции максимизации.

Таким образом, минимизируемые критерии (2.25), (2.26), (2.30) будем включать в математическую модель со знаком минус.

После построения множества Парето по найденному множеству возможных векторов *U*, согласно методу последовательного сужения множества Парето [19], менее важный *j*-й критерий в общем списке критериев необходимо заменить новым, вычисленным по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Затем следует найти множество Парето относительно нового векторного критерия. [19]. После построения нового множества, в случае, если оно оказывается приемлемым для окончательного выбора, процесс принятия решений заканчивается. В противном случае дальнейший выбор следует производить в пределах найденного множества Парето, получив дополнительную информацию об относительной важности критериев [19].

Алгоритм последовательного сужения множества Парето представлен ниже на рисунке 2.3.



Рис. 2. Алгоритм последовательного сужения множества Парето

**Учет информации об относительной важности критериев**

Описанный выше метод последовательного сужения множества Парето на основе относительной важности критериев предполагает учет сразу нескольких сообщений об относительной важности.

Можно выделить следующие возможные случаи подобных сообщений:

1. *имеются 2 критерия, причем каждый из них оказывается важнее другого;*

В этом случае необходимо дважды воспользоваться формулой (2.50)

1. *один критерий важнее каждого из двух других в отдельности;*

В данном случае новый векторный критерий, размерность которого будет на единицу больше, необходимо сформировать по описанному ниже правилу.

Пусть имеются два сообщения о том, что *i-й* критерий важнее *j-го* критерия с коэффициентом относительной важности , а также, что *i-й* критерий важнее *k-го* критерия с коэффициентом относительной важности . Тогда для нового сформированного векторного критерия *g*, имеющего размерность *m+1*, справедливы следующие соотношения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |
|  | (.) |
|  | (.) |
|  | (.) |

1. *два критерия по отдельности важнее третьего;*

Пусть имеются два сообщения о том, что *i-й* критерий важнее *k-го* критерия с коэффициентом относительной важности , а также, что *j-й* критерий важнее *k-го* критерия с коэффициентом относительной важности . В этом случае новый векторный критерий *g* будет иметь вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |
|  | (.) |

1. *один критерий важнее второго, а он, в свою очередь, важнее третьего;*

В этом случае дважды применяется формула (2.50). Сначала пересчитывается третий критерий, а затем второй.

1. *имеются два произвольных взаимно независимых сообщения;*
2. *имеется более двух сообщений, состоящих в том, что каждый из определенного набора критериев важнее одного и того же критерия, не входящего в указанный набор;*

Пусть имеется набор информации об относительной важности, состоящей из *l* сообщений о том, что *i1-й* критерий важнее *k-го* критерия с коэффициентом относительной важности , *i2-й* критерий важнее *k-го* критерия с коэффициентом относительной важности , …, *il-й* критерий важнее *k-го* критерия с коэффициентом относительной важности .

В этом случае новый векторный критерий *g* будет иметь вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |
|  | (.) |

1. *имеется произвольное конечное число попарно взаимно независимых сообщений об относительной важности критериев;*

Пусть имеется набор взаимно независимой информации об относительной важности критериев, состоящий из *k* сообщений о том, что группа критериев важнее группы критериев с коэффициентами относительной важности для всех

В этом случае новый векторный критерий *g* будет иметь вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

С учетом сложности поставленной задачи и математических вычислений, при реализации экспертного блока программного обеспечения ограничимся возможностью задавать коэффициенты относительной важности критериев, подходящей только под пункт 2, описанных выше случаев.

**Метод целевого программирования**

После построения и последовательного сужения множества Парето будем применять метод целевого программирования [22] для окончательного выбора оптимального векторного критерия.

В качестве входных данных имеем набор векторных критериев Каждый из критериев необходимо минимизировать на множестве возможных решений . Здесь и далее *m* = 4, так как задача решается с учетом 4 критериев.

В рамках метода целевого программирования полагается, что в пространстве *Rm* задано непустое множество *U*, которое называют множеством «идеальных» векторов. Данное множество считается недостижимым, т.е. выполняется равенство [19]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где – множество возможных векторов.

Т.к. в нашем случае все критерии необходимо минимизировать, то в качестве такого «идеального» множества векторов будем рассматривать множество, состоящее из одного вектора – начала координат:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Кроме этого, на критериальном пространстве задается метрика – числовая функция которая каждой паре векторов *y, z* сопоставляет неотрицательное число, называемое расстоянием между векторами *y* и *z*.

Будем использовать квадратичную метрику, описывающую квадрат расстояния:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Оптимальным объявляется такое решение для которого выполняется равенство [19]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

которое означает, что оценка , соответствующая наилучшему решению , должна быть расположена как можно ближе к множеству идеальных оценок.

Таким образом, совокупность разделов 2.3.1 и 2.3.2 представляет собой описание предложенного для решения поставленной многокритериальной задачи метода.

## Алгоритм решения многокритериальной оптимизационной задачи

В данном разделе подробно описывается алгоритм, реализующий решение предложенного в разделе 2.3 метода.

### Алгоритм прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска

В данном разделе приводится алгоритм реализации метода прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска, который был выбран для решения многокритериальной оптимизационной задачи (раздел 1.1).

В таблице 2.22 ниже приведены исходные данные, необходимые для решения стандартной оптимизационной задачи.

Таблица 2. Исходные данные стандартной оптимизационной задачи

|  |  |
| --- | --- |
| **Название** | **Обозначение** |
| Минимизируемая функция *f* от *n* переменных |  |
| Допустимые границы варьирования переменных *xi* |  |
| Функциональные ограничения | где c – количество функциональных ограничений |

Поиск оптимального решения осуществляется в *Q* сериях по *P* итераций в каждой серии. Количество итераций в серии *P* определяется в результате исследования конкретной модели в зависимости от ее сложности (количества переменных, ширины их диапазонов варьирования).

Количество серий *Q* определяется из соображений точности, накладываемой на искомые параметры:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где *eps* – точность вычислений, – параметр, определяющий уменьшение интервала поиска (обычно принимается = 0.05), – диапазон варьирования неизвестных : = - , *i = 1..n.*

В результате математических преобразований выражение для *Q* представляется в форме:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |
|  | (.) |

Алгоритм прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска состоит из следующих шагов:

**Шаг 1.** Определяется начальное решение. Оно получается как середины варьируемых диапазонов для каждой переменной:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

Формируется вектор начальных решений . Векторы оптимальных решений и промежуточного оптимума полагаются равными :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

**Шаг 2.** Вычисляется случайная точка *x*:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

где *r* – случайная величина, равномерно распределенная на интервале (-0.5; 0.5).

**Шаг 3.** Выполняется проверка на допустимость:

- если , то принимаем ;

- если то принимаем

Также на данном шаге производится проверка на удовлетворение функциональным ограничениям (таблица 2.22). Если найденная точка не удовлетворяет хотя бы одному из них – она отбрасывается, и происходит возвращение на **Шаг 2** алгоритма.

**Шаг 4.** Вычисляется функция Если значение то принимаем . Если *p < P*, то увеличиваем p на 1 и переходим к **Шагу 2** алгоритма. Если *p = P*, - переходим к **Шагу 5**.

**Шаг 5**. Если *q < Q*:

- принимаем

- уменьшаем интервал поиска*:*

- увеличиваем *Q* на 1 и переходим к **Шагу 2.**

Если *q = Q*, - то заканчиваем вычисления.

### Модификация алгоритма прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска

Для возможности применения описанного в разделе 2.4.1 алгоритма прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска для решения поставленной в разделе 1.1 задачи оптимизации в данный алгоритм необходимо внести модификации.

В соответствии с поставленной задачей многокритериальной оптимизации (раздел 1.1), каждый из котлоагрегатов, находящихся в составе очереди «90 ата» котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго, может иметь значение паропроизводительности , расположенное в заданных для него пределах .

Паровая нагрузка котлоагрегата – это входной управляющий параметр математической модели (таблица 2.2).

Рассмотрим ситуацию, когда группе котлоагрегатов необходимо обеспечить суммарную паропроизводительность = 500 т/ч.

Пусть текущая комбинация работающих котлоагрегатов состоит из 3 котлов: **K1** (, **K2** , **K3**

Так как , - данная комбинация работающих котлоагрегатов является допустимой.

Согласно описанному в разделе 2.4.1 выше алгоритму, на **Шаге 1** необходимо выбрать начальное решение, при этом значения выбираются как середины соответствующих интервалов допустимых значений.

Тогда для переменных ,, получим:

;

;

= 240 т/ч.

В результате, для будет получено недопустимое значение, которое не входит в заданные для этого котлоагрегата допустимые границы варьирования паропроизводительности.

В соответствии с этим для **Шага 1** описанного в разделе 2.4.1 алгоритма прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска была разработана следующая модификация. Выбор начального решения осуществляется по следующему алгоритму:

1. Для всех , принять:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (.) |

1. = ,

где – заданная суммарная паропроизводительность, которую должна обеспечить группа котлоагрегатов.

1. Если , - завершить алгоритм выбора начального решения, иначе, - перейти к пункту 4.
2. Если , - перейти к пункту 5. Если , - это означает, что котлоагрегаты *1..n-1* нагружены на столько, что могут выполнить (или перевыполнить) план по суммарной паропроизводительности, соответственно, их нужно «разгрузить», - переходим к пункту 8.
3. Если , - это говорит о том, что паровая нагрузка, которую должен иметь *n-ый* котел в данной комбинации, чтобы обеспечить выполнения общего плана паропроизводительности очереди котлоагрегатов, превышает максимально допустимую паровую нагрузку для *n*-го котлоагрегата. Соответственно, необходимо сильнее нагрузить котлоагрегаты *1..n-1*. Переходим к пункту 6. Если , - это говорит о том, что паровая нагрузка, «оставшаяся» для n-го котла, меньше минимально допустимой паровой нагрузки для этого котла. Соответственно, необходимо «разгрузить» котлоагрегаты *1..n-1* и сильнее нагрузить *n-ый* котлоагрегат. Переходим к шагу 7.
4. Принять:

До тех пор, пока *i > 0* выполнять:

Если

Иначе завершить цикл по *i.*

*i = i – 1.*

1. Принять

До тех пор, пока *i > 0* выполнять:

Если

Иначе завершить цикл по *i.*

*i = i – 1.*

1. Принять

До тех пор, пока *i > 0* выполнять:

Если

Иначе завершить цикл по *i.*

*i = i – 1.*

Приведем блок-схему алгоритма формирования множества возможных векторных критериев, реализующего предложенный в разделе 2.3.1 метод, с учетом алгоритма прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска, описанного в разделе 2.4.1, а также его модификаций, сформулированных в разделе 2.4.2.

Блок-схема общего алгоритма представлена на рисунках 2.4, 2.5, 2.6.



Рис. 2. Общая схема алгоритма формирования множества векторных критериев



Рис. 2. Алгоритм «локальной» оптимизации группы котлоагрегатов



Рис. 2. Модификация алгоритма прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска

# Технологический раздел

## Выбор и обоснование технологии разработки программного комплекса

### Разработка модели

Для разработки математической модели и основной логики программного комплекса был выбран язык программирования Java и среда программирования Eclipse Kepler (4.3).

В настоящее время существует множество языков и сред программирования, многие из которых обладают достаточно высокой эффективностью, удобством и простотой в использовании. Для разработки данного программного продукта использовалась платформа Java и среда Eclipse Kepler (4.3).

Java – универсальный кросс-платформенный объектно-ориентированный язык программирования, разработанный компанией Sun Microsystems. В настоящий момент собственником технологии является компания Oracle Corporation (сделка по приобретению Sun Microsystems компанией Oracle Corporation была оформлена в 2009 году).

Язык Java предоставляет программисту широкие возможности реализации самых разнообразных алгоритмов, обладая высокой эффективностью, гибкостью и универсальностью. Он позволяет в полной мере реализовать концепцию объектно-ориентированного программирования.

На данный момент платформу Java используют более 9 миллионов разработчиков программного обеспечения. Она используется во всех основных сферах деятельности и применяется в самых различных устройствах, компьютерах и сетях. Универсальность, эффективность, совместимость с разными платформами и безопасность технологии Java делают ее идеальным инструментом для сетевых технологий.

Java протестирована, доработана, расширена и проверена специализированным сообществом. В этом сообществе насчитывается более 9 миллионов разработчиков. Это самое большое и самое активное сообщество на планете. Благодаря своей универсальности, эффективности и кросс-платформенной совместимости Java стала незаменимой для разработчиков.

**Основные преимущества платформы Java:**

* возможность запуска приложений под управлением большинства современных операционных систем;
* высокая надежность и безопасность;
* переносимость;
* высокая производительность;
* автоматическое управление выделением памяти;
* простые и удобные возможности разработки web-приложений и распределенных сетевых приложений;
* богатые возможности фильтрации ввода/вывода;
* средства создания многопоточных приложений.

**Что предлагает Java пользователям:**

* экономия средств при внедрении новых и миграции существующих систем за счет унификации платформы и возможности выбора различных решений, поддерживающих технологию Java.
* отсутствие жесткой зависимости от поставщика программного обеспечения.
* использование Java-технологий позволяет компаниям двигаться быстрее, быть более гибкими и более эффективно реагировать на изменяющиеся условия рынка, создавая возможности для получения прибыли.
* никакая другая современная технология не обладает такими широкими возможностями на настольных компьютерах, серверах и мобильных устройствах одновременно с признанием в промышленности и широтой распространения, как платформа Java.

На данный момент существует множество средств разработки на этом языке. Для разработки данного проекта была выбрана среда Eclipse Kepler (4.3). Она зарекомендовала себя своей стабильностью и широкими возможностями. Дизайн среды ориентирован на продуктивность работы программистов, позволяя им сконцентрироваться на разработке функциональности, в то время как Eclipse берет на себя выполнение рутинных операций.

### Разработка интерфейса

Для разработки дружественного пользовательского интерфейса использовалась платформа JavaFX.

JavaFX — платформа для создания Rich Internet application (RIA), позволяет строить унифицированные приложения с насыщенным графическим интерфейсом пользователя для непосредственного запуска из-под операционных систем, работы в браузерах и на мобильных телефонах, в том числе, работающих с мультимедийным содержимым [ссылка].

Приложения JavaFX создаются с помощью декларативного языка программирования JavaFX Script. Для разработки приложений на языке JavaFX Script необходимо установить JavaFX SDK который входит в поставку с Java SE 7. Из кода, написанного на языке JavaFX Script, можно обращаться к любым библиотекам Java. Поэтому совместное использование языков Java и JavaFX Script позволяет решать разнообразные задачи, например, логика бизнес-приложения может быть написана на Java, а графический интерфейс пользователя — на JavaFX Script.

### Используемые библиотеки

В таблице 3.1 перечислены open-source библиотеки, используемые при разработке программного комплекса.

Таблица 3. Библиотеки, используемые при разработке программного комплекса

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Название** | **Описание** | **Версия** |
| Jama | Представляет собой пакет основной линейной алгебры для Java. Предоставляет классы для построения и работы с матрицами, предназначен для обеспечения достаточной функциональности для выполнения рутинных задач образом, понятным для неспециалистов [23]. | 1.0.3 |
| JUnit | Представляет собой простой Framework для создания и выполнения модульных тестов на Java [24]. | 4.11 |
| JCommon | JFreeChart это бесплатная Java библиотека, которая упрощает разработчикам отображать графики профессионального качества в своих приложениях. Проект JFreeChart был основан в феврале 2000 года Дэвидом Гилбертом. Этот проект продолжает развиваться и поддерживаться Дэвидом Гилбертом, при участии большого сообщества разработчиков [25]. | 1.0.21 |
| JFreeChart | 1.0.17 |
| JFreeChart-swt | 1.0.17 |
| Log4j | Log4j — библиотека журналирования Java программ, часть общего проекта «Apache Logging Project».  Log4j первоначально развивался в рамках зонтичного «Apache Jakarta Project», ответственного за все Java-проекты Apache, но впоследствии выделился в отдельный, очень популярный проект журналирования [26]. | 1.2.17 |

### Требование к вычислительной системе

Разрабатываемая система требовательна к аппаратным ресурсам вычислительной машины, поскольку в процессе функционирования системы необходимо выполнять различные алгоритмы с высокой вычислительной сложностью.

Разрабатываемый продукт тестировался и показывал приемлемые результаты в системе, отвечающей требованиям, представленным в таблице 3.2.

Таблица 3. Требования к вычислительной системе

|  |  |
| --- | --- |
| **Компонент** | **Значение** |
| Процессор | Intel Core i5, 2.3Ghz |
| Оперативная память | 8192 Мб |
| Жесткий диск | 500 Gb |
| Видео система | NVIDIA GeForce GT 520M |
| Операционная система | Windows 7 Professional, SP1 |

Сама платформа Java, согласно данным, представленным компанией Oracle [27], предъявляет системные требования, описанные в таблице 3.3:

Таблица 3. Требования платформы Java

|  |  |
| --- | --- |
| **Компонент** | **Значение** |
| Процессор | Intel и совместимые с ним на 100% процессоры других производителей |
| Рекомендуемый процессор | Pentium с тактовой частотой 166 МГц и выше |
| Оперативная память | емкостью не менее 64 МБ |
| Жесткий диск | минимум 98 МБ свободного дискового пространства |

## Диаграммы классов разработанного программного комплекса

В данном разделе приводятся диаграммы классов и описание основных пакетов разработанного программного комплекса.

На рисунке 3.1 ниже представлена диаграмма классов для пакета расчета расхода топлива котлоагрегатом.

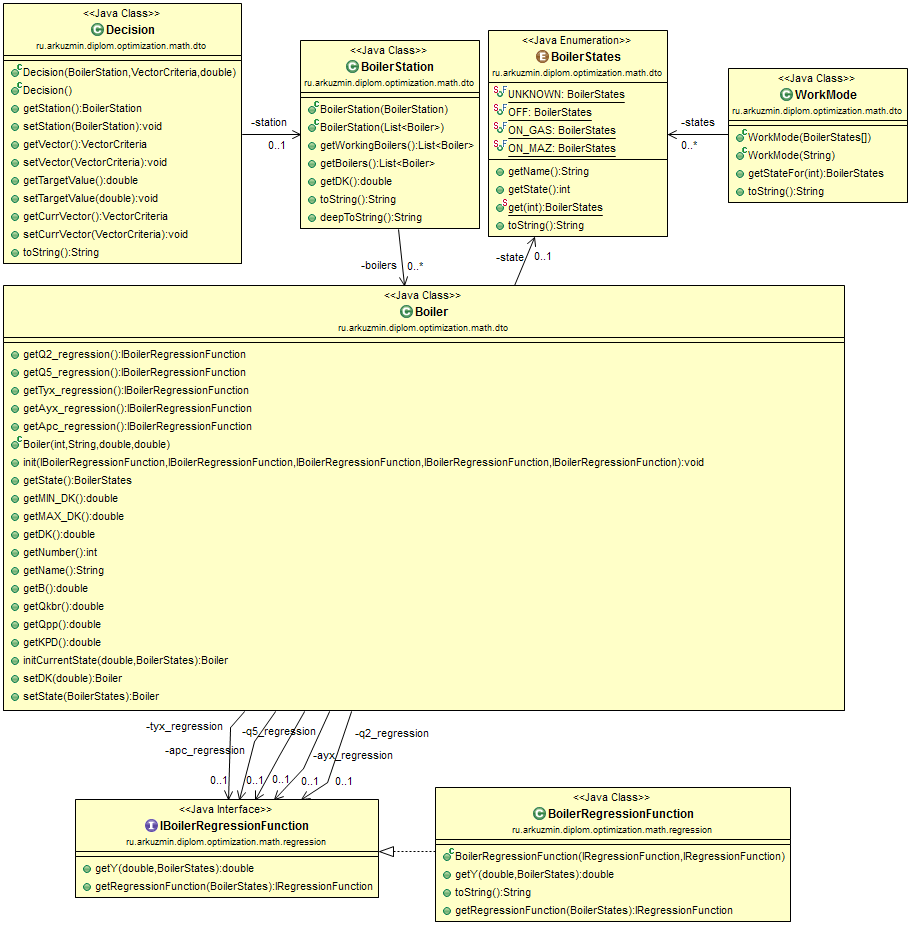


Рис. 3. Диаграмма классов пакета расчета расхода топлива котлоагрегатом

Опишем подробнее основные классы, входящие в состав данного пакета.

**Decision**

Класс «Decision» представляет собой решение многокритериальной оптимизационной задачи. Он хранит в себе оптимальное значение целевой функции, состав котлоагрегатов очереди с оптимальным распределением паровых нагрузок между ними, а также оптимальный векторный критерий.

**BoilerStation**

Класс «BoilerStation» представляет собой очередь котлоагрегатов. Она хранит в себе текущий состав очереди, режим работы и паровую нагрузку для каждого из котлоагрегатов.

**BoilerStates**

Перечисление «BoilerStates» - это все возможные состояние работы котлоагрегатов очереди. Допускаются значения:

- неопределено;

- работает на газе;

- работает на мазуте;

- выключен.

**WorkMode**

Хранит текущий режим работы для очереди котлоагрегатов.

**Boiler**

Основной класс данного пакета. Представляет собой котлоагрегат очереди. Хранит текущее состояние котлоагрегата, его паровую нагрузку и режим работы, ограничения на допустимую паровую нагрузку, регрессионные зависимости для различных состояний данного котлоагрегата. Используется для определения величины расхода топлива котлоагрегатом при текущей конфигурации его работы.

**BoilerRegressionFunction**

Используется для хранения регрессионных зависимостей котлоагрегата. Хранит в себе регрессионные зависимости для различных режимов работы котла. Реализует интерфейс **IBoilerRegressionFunction**.

На рисунке 3.2 ниже представлена диаграмма классов для пакета выделенных критериев оптимизации (раздел 1.1).

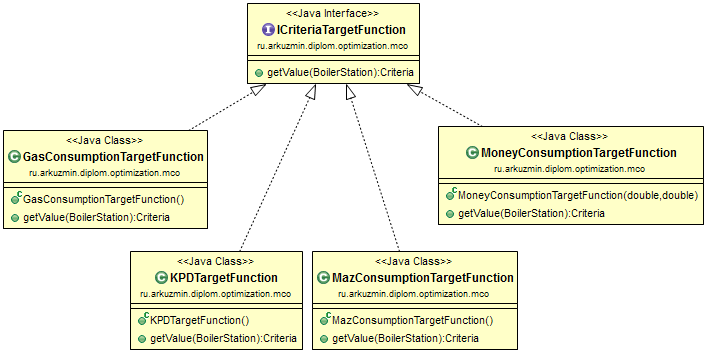


Рис. 3. Диаграмма классов пакета выделенных критериев оптимизации

Опишем подробнее основные классы, входящие в состав данного пакета.

**ICriteriaTargetFunction**

Данный интерфейс реализуют все выделенные критерии оптимизации. Все классы, реализующие данный интерфейс, должны уметь возвращать значение критерия для заданного состава очереди котлоагрегатов.

**GasConsumptionTargetFunction**

Представляет собой целевую функцию расхода газа котлоагрегатом. Реализует интерфейс **ICriteriaTargetFunction.**

**MazConsumptionTargetFunction**

Представляет собой целевую функцию расхода мазута котлоагрегатом. Реализует интерфейс **ICriteriaTargetFunction.**

**MoneyConsumptionTargetFunction**

Представляет собой целевую функцию финансовых затрат на используемое топливо. Реализует интерфейс **ICriteriaTargetFunction.**

**KPDTargetFunction**

Представляет собой целевую функцию КПД очереди котлоагрегатов. Реализует интерфейс **ICriteriaTargetFunction.**

На рисунке 3.3 ниже представлена диаграмма классов для пакета многокритериальной оптимизации.

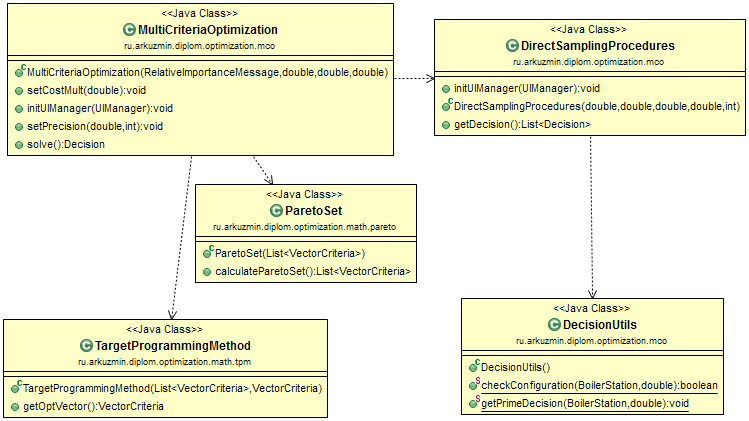
****Опишем подробнее основные классы, входящие в состав данного пакета.

Рис. 3. Диаграмма классов пакета многокритериальной оптимизации

**DecisionUtils**

Данный класс содержит вспомогательные методы для проведения многокритериальной оптимизации. Реализует описанный в разделе 2.4.2 алгоритм выбора начального решения для метода прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска.

**DirectSamplingProcedures**

Реализует метод прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска для проведения «локальной» оптимизации распределения паровых нагрузок на заданной комбинации котлоагрегатов. Для выбора начального решения использует класс **DecisionUtils.**

**ParetoSet**

Реализует алгоритм построения множества Парето, описанный в разделе 2.3.2.

**TargetProgrammingMethod**

Реализует метод целевого программирования, описанный в разделе 2.3.2, для окончательного выбора оптимального решения.

**MultiCriteriaOptimization**

Реализует разработанный и описанный в разделе 2.3 метод многокритериальной оптимизации режимов работы котельного отделения электростанции. Использует классы: **DirectSamplingProcedures, ParetoSet, TargetProgrammingMethod.**

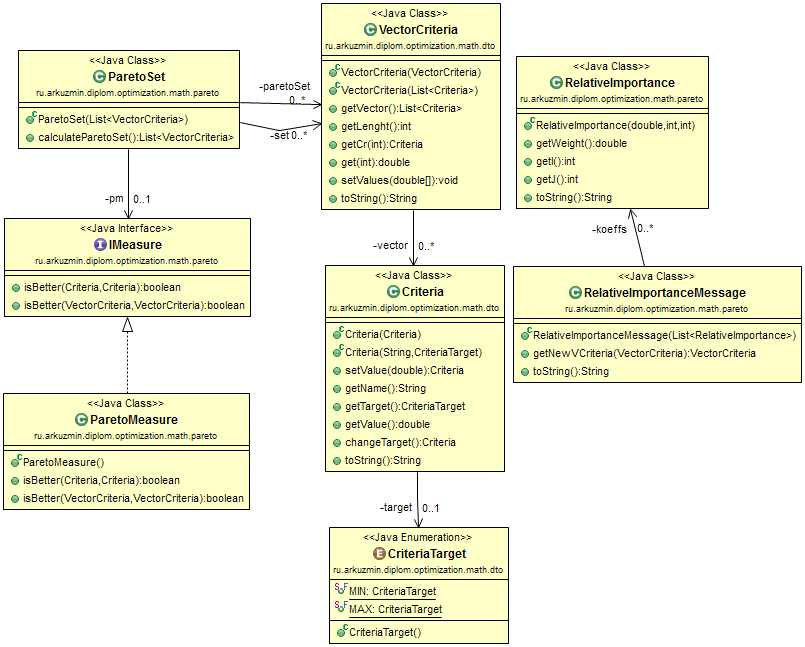
На рисунке 3.4 ниже представлена диаграмма классов для пакета построения и сужения множества Парето.

Рис. 3. Диаграмма классов пакета построения и сужения множества Парето

Опишем подробнее основные классы, входящие в состав данного пакета.

**CriteriaTarget**

Перечисление. Содержит возможные цели оптимизации выделенные критериев. Допускает значения: CriteriaTarget**.MIN**, CriteriaTarget.**MAX**, используемые при минимизации и максимизации выделенных критериев соответственно.

**Criteria**

Хранит название критерия оптимизации, его значение, а также цель оптимизации. Использует **CriteriaTarget.**

**VectorCriteria**

Векторный критерий оптимизации. Представляет собой набор выделенных критериев оптимизации, представленных классами **Criteria.**

**ParetoMeasure**

Представляет собой меру для сравнения векторных критериев и возможности построения множества Парето. Реализует интерфейс **IMeasure.**

**RelativeImportance**

Представляет собой коэффициент относительной важности критериев. Хранит значение относительной важности, а также номера более значимого критерия и менее значимого.

**RelativeImportanceMessage**

Сообщение об относительной важности. Хранит заданные коэффициенты относительной важности критериев оптимизации с помощью классов **RelativeImportance.** Позволяет пересчитывать координаты векторных критериев на основе заданных коэффициентов относительной важности.

На рисунке 3.5 представлена диаграмма классов пакета построения функциональных зависимостей для котлоагрегатов.

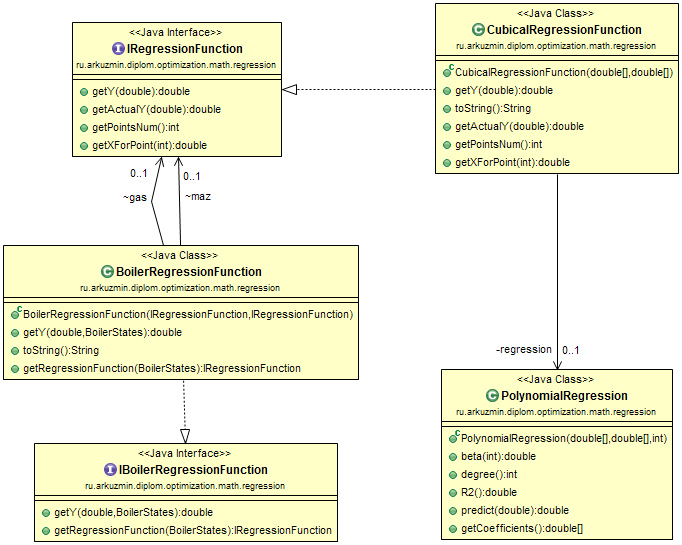
 Опишем подробнее основные классы, входящие в состав данного пакета.

Рис. 3. Диаграмма классов пакета построения функциональных зависимостей для котлоагрегатов

**PolynomialRegression**

Описывает полиномиальную зависимость между двумя наборами действительных значений.

**CubicalRegressionFunction**

Представляет собой полиномиальную зависимость 3-ей степени между двумя наборами действительных значений. Использует класс **PolynomialRegression,** реализует интерфейс **IRegressionFunction.**

**BoilerRegressionFunction**

Хранит функциональные зависимости параметров котлоагрегата, описанные в разделе 2.2.7 от паровой нагрузки на котлоагрегат. Использует интерфейсы **IRegressionFunction**, реализует интерфейс **IBoilerRegressionFunction.**

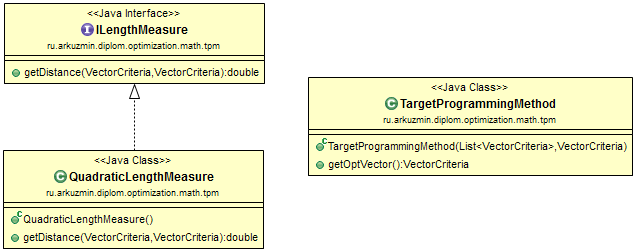
На рисунке 3.6 представлена диаграмма классов пакета, реализующего метод целевого программирования.

Рис. 3. Диаграмма классов пакета, реализующего метод целевого программирования

Опишем подробнее основные классы, входящие в состав данного пакета.

**QuadraticLengthMeasure**

Представляет собой квадратичную меру расстояния между векторами на критериальном пространстве, используемую для выбора окончательного оптимального решения задачи многокритериальной оптимизации (раздел 2.3.2), описанной в разделе 1.1. Реализует интерфейс **ILengthMeasure.**

## Тестирование программного комплекса

В таблице 3.4 представлены результаты модульного тестирования для разработанного программного комплекса.

Таблица 3. Модульное тестирование разработанного метода многокритериальной оптимизации

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Тестируемый метод** | **Описание теста** | **Степень важности** | **Ожидаемый результат** | **Результат теста** |
| 1 | WorkMode.getAllWorkModes | Проверка генерации всех возможных режимов работы очереди котлоагрегатов | Фатальная | Для очереди, состоящей из 6 котлоагрегатов, работающих на газе или мазуте, сгенерировано 729 возможных состояний. | Тест пройден |
| 2 | ParetoSet.calculateParetoSet | Проверка вычисления множества Парето на основе множества возможных векторных решений | Фатальная | Для заданного множества возможных векторных решений построено множество Парето оптимальных решений | Тест пройден |
| 3 | RelativeImportanceMessage.getNewVCriteria | Проверка пересчета координат векторного критерия на основе информации об относительной важности критериев оптимизации | Фатальная | Для заданного векторного критерия и коэффициентов относительной важности критериев оптимизации построен новый векторный критерий | Тест пройден |
| 4 | TargetProgrammingMethod.getOptVector | Проверка определения оптимального решения с помощью метода целевого программирования | Фатальная | Для заданного множества векторных критериев выбрано оптимальное решение на критериальном пространстве | Тест пройден |
| 5 | PrimeDecisionUtils.getPrimeDecision | Проверка выбора начального решения для «локальной» оптимизации на заданной комбинации котлоагрегатов | Важная | Для заданной комбинации работающих котлоагрегатов очереди выбрано начальное решение, удовлетворяющее заданным ограничениям | Тест пройден |
| 6 | DirectSamplingProcedures.getDecision | Проверка выполнения «локальной» оптимизации по распределению паровых нагрузок между котлоагрегатами и формирования множества возможных векторных решений | Фатальная | Для очереди из 6 котлоагрегатов построено множество возможных векторных решений и проведена «локальная» оптимизация на для каждого из режимов работы очереди котлоагрегатов | Тест пройден |
| 7 | MultiCriteriaOptimization.solve | Проверка работоспособности разработанного метода многокритериальной оптимизации | Фатальная | Для очереди котлоагрегатов проведена многокритериальная оптимизация режимов работы, рассчитан оптимальный состав оборудования, виды используемого топлива, оптимальные паровые нагрузки для каждого из котлоагрегатов очереди | Тест пройден |

**Выводы**

Как видно из таблицы 3.4, тестирование разработанного метода многокритериальной оптимизации режимов работы котельного отделения электростанции выполнено успешно. Все тесты пройдены.

# Исследовательский раздел

В данном разделе проводится проверка адекватности разработанного метода многокритериальной оптимизации режимов работы котельного отделения электростанции. А также приводится расчет оптимального состава котельного отделения и нагрузок на котлоагрегаты для нескольких возможных ситуаций на рынке электроэнергии.

Решаемые в ходе исследования задачи:

1. Анализ значений расхода топлива котлоагрегатами при различных паровых нагрузках, полученных в результате разработки и внедрения компанией ЗАО «Крок инкорпорейтед» программного комплекса «I4Plan» для определения планового состава оборудования на электростанции ТЭЦ-20 Мосэнерго;
2. Сравнение значений расхода топлива котлоагрегатами при тех же значениях паровых нагрузок, полученных с помощью разработанного программного комплекса со значениями «I4Plan»;
3. Выявление процента расхождения в сравниваемых значениях и его логическое теоретическое объяснение;
4. Проверка адекватности полученных с помощью разработанного программного комплекса значений расхода газа котлоагрегатами при различных паровых нагрузках;
5. Выбор нескольких возможных для рынка электроэнергии ситуаций и проведение расчетов с помощью разработанного программного комплекса для каждой из них;
6. Анализ полученных результатов для выбранных ситуаций и сравнение с имеющимися результатами оптимизации планового состава оборудования на электростанции ТЭЦ-20 Мосэнерго, полученными с помощью «I4Plan».

## Проверка адекватности разработанного метода

В данном разделе приводятся значения расхода топлива котлоагрегатами при различных паровых нагрузках, полученные с помощью программного комплекса «I4Plan», а также значения расхода топлива, полученные с помощью разработанного программного комплекса. Выявляется процент расхождения в сравниваемых значениях. Приводится его логическое теоретическое объяснение. Выполняется проверка адекватности

В 2012 году в рамках проекта «Инновация 4 Generation» компанией ЗАО «Крок инкорпорейтед» была разработана и введена в эксплуатацию на ТЭЦ-20 Мосэнерго система моделирования и оптимизации режимов работы электростанции (далее «СМиОР»), в состав которой входит бизнес процесс «I4Plan», отвечающий за определение планового состава оборудования и оптимального распределения нагрузок между энергоагрегатами.

Во время эксплуатации «СМиОР» [2] был достигнут экономический эффект в виде сокращения потребности в топливе на 3.28%, из которых: 0.6% - за счет выбора оптимального планового состава оборудования и 0.56% за счет оптимизации распределения топлива между котлоагрегатами, что в масштабах общих финансовых затрат на используемое топливо является крупной экономической выгодой.

Данные результаты позволяют рассматривать внедренную на ТЭЦ-20 Мосэнерго «СМиОР» применимой к решению подобного рода задач оптимизации.

Приведем зависимости расхода газа для котлов «К4» и «К6» очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго от паровой нагрузки, полученные с помощью «I4Plan», а также с помощью разработанного программного комплекса. Сведем эти значения в одну таблицу и проанализируем.

В таблице 4.1 приведены значения расхода газа котлом «К4» очереди «90 ата» котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго при различных значениях паровой нагрузки на котел, полученные с помощью «I4Plan» значения расхода газа, полученные при тех же нагрузках, вычисленные с помощью разработанного программного комплекса, а также процент расхождения между значениями.

Таблица 4. Расход газа котлом «К4» в зависимости от паровой нагрузки.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Паровая нагрузка, [тонн/час]** | **Расход газа («I4Plan»), [тыс.нм3/час]** | **Расход газа (разработанный программный комплекс), [тыс.нм3/час]** | **Процент расхождения сравниваемых данных, [%]** |
| 130 | 10,42 | 10,24 | 1,75 |
| 141 | 11,31 | 11,1 | 1,80 |
| 183 | 14,63 | 14,39 | 1,66 |
| 198 | 15,83 | 15,56 | 1,76 |
| 200 | 15,99 | 15,72 | 1,74 |

Как видно из таблицы 4.1, результаты, полученные с помощью разработанного программного комплекса близки к результатам, полученным с помощью «I4Plan». Средний процент расхождения данных составляет 1.74%.

Рис. 4. Зависимости расхода газа котлом «К4» от паровой нагрузки.

На рисунке 4.1 представлены графики зависимостей расхода газа котлом «К4» от паровой нагрузки для значений, полученных с помощью «I4Plan», а также с помощью разработанного программного комплекса.

Как видно по рисунку 4.1, различия в значениях расхода топлива котлом для «I4Plan» и для разработанного программного комплекса во всем диапазоне рассматриваемой паровой нагрузки примерно одинаковы, что соответствует данным таблицы 4.1 и позволяет судить о высокой степени схожести в зависимостях.

Проанализируем значения расхода газа для котла «К6» очереди «90 ата» котельного отделение ТЭЦ-20 Мосэнерго. В таблице 4.2 приведены значения расхода газа котлом «К6» при различных значениях паровой нагрузки на котел, полученные с помощью «I4Plan», значения расхода газа, полученные при тех же нагрузках, вычисленные с помощью разработанного программного комплекса, а также процент расхождения между значениями.

Таблица 4. Расход газа котлом «К6» в зависимости от паровой нагрузки.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Паровая нагрузка, [тонн/час]** | **Расход газа («I4Plan»), [тыс.нм3/час]** | **Расход газа (разработанный программный комплекс), [тыс.нм3/час]** | **Процент расхождения сравниваемых данных, [%]** |
| 130 | 10,41 | 10,24 | 1,70 |
| 140 | 11,21 | 11,03 | 1,57 |
| 189 | 15,1 | 14,84 | 1,74 |
| 219 | 17,5 | 17,2 | 1,74 |

Как видно из таблицы 4.2, результаты, полученные с помощью разработанного программного комплекса близки к результатам, полученным с помощью программного комплекса «I4Plan». Средний процент расхождения данных составляет 1.69%. На рисунке 4.2 представлены графики зависимостей расхода газа котлом «К6» от паровой нагрузки на котел.

Рис. 4. Зависимости расхода газа котлом «К6» от паровой нагрузки.

Сравнительный анализ полученных зависимостей

Проведем сравнительный анализ значений расхода газа для котлов «К4» и «К6», полученных с помощью расчетов в «I4Plan» и разработанного программного комплекса. Эти значения представлены в таблицах 4.1 и 4.2.

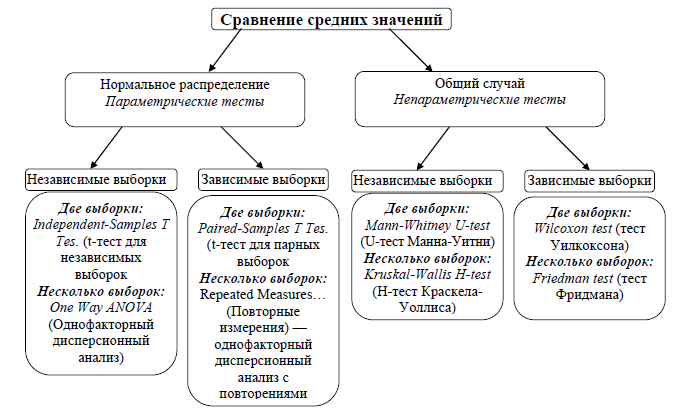
Основная задача сравнительного анализа – это сравнение средних генеральных совокупностей [28]. На рисунке 4.3 представлена схема проверки гипотез при сравнении средних:

Рис. 4. Сравнение средних: схема проверки гипотез

Рассчитанные наборы значений являются независимыми выборками, так как эксперименты проводились отдельно в «I4Plan» и с помощью разработанного программного комплекса.

Распределения значений расхода газа имеют некоторый неизвестный характер (общий случай).

Исходя из приведенных выше соображений, с помощью схемы, приведенной на рисунке 4.3, выберем для сравнительного анализа выборок значений расхода газа непараметрический тест, а именно U-тест Манна-Уитни [29].

Непараметрические тесты предназначены преимущественно для проверки статистических гипотез методами, не связанными с видом распределения совокупности. В частности, применение этих методов не требует предположения о нормальности распределения, которое необходимо для правомерного использования одномерного дисперсионного анализа, t-теста, при определении значимости корреляций и т.д.

Сравнительный анализ выборок с помощью непараметрических тестов основан на использовании среднего ранга [28].

U-критерий Манна–Уитни.

Приведем описание U-критерия Манна-Уитни и алгоритма его расчета.

U-критерий Манна–Уитни – это статистический критерий, используемый для оценки различий между двумя независимыми выборками по уровню какого-либо признака, измеренного количественно. Он позволяет вычислять различия в значении параметра между малыми выборками.

Для возможности применения данного критерия выборки должны удовлетворять следующим ограничениям:

1. В каждой из выборок должно быть не менее 3 значений признака. Допускается, чтобы в одной выборке было два значения, но во второй тогда не менее пяти;
2. В выборочных данных не должно быть совпадающих значений (все числа — разные) или таких совпадений должно быть очень мало.

По таблицам значений 4.1 и 4.2 видно, что исследуемые выборки удовлетворяют перечисленным выше ограничениям.

Для применения U-критерий Манна–Уитни необходимо выполнить следующие действия:

1. Составить единый ранжированный ряд из обеих сопоставляемых выборок, расставив их элементы по степени нарастания признака и приписав меньшему значению меньший ранг. Общее количество рангов получится равным: . Где - количество элементов в первой выборке, – количество элементов во второй выборке.
2. Разделить единый ранжированный ряд на два, состоящих соответственно из единиц первой и второй выборок. Подсчитать отдельно сумму рангов, пришедшихся на долю элементов первой выборки, и отдельно — на долю элементов второй выборки. Определить б**о**льшую из двух ранговых сумм (), соответствующую выборке с элементами.
3. Определить значение U-критерий Манна–Уитни по формуле:
4. По таблице для избранного уровня статистической значимости определить критическое значение критерия для данных и . Если полученное значение U меньше табличного или равно ему, то признается наличие существенного различия между уровнем признака в рассматриваемых выборках (принимается альтернативная гипотеза). Если же полученное значение U больше табличного, принимается нулевая гипотеза H0 (Уровень признака в группе не ниже уровня признака в группе ). Достоверность различий тем выше, чем меньше значение U.

Расчет U-критерий Манна–Уитни для расходов топлива котлом «К4».

Проведем расчет U-критерий Манна–Уитни для расходов топлива котлом «К4» по данным, приведенным в таблице 4.1.

В таблице 4.3 приведены ранжированные значения расходов топлива котлом «К4» для результатов «I4Plan» и результатов, полученных с помощью разработанной математической модели.

Таблица 4. Ранжированные выборок расхода топлива котлом «К4»

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Расход газа («I4Plan»), [тыс.нм3/час]** | **Ранг «I4Plan»** | **Расход газа (разработанный программный продукт), [тыс.нм3/час]** | **Ранг значений разработанного программного продукта** |
| 1 | 10,42 | 2 | 10,24 | 1 |
| 2 | 11,31 | 4 | 11,1 | 3 |
| 3 | 14,63 | 6 | 14,39 | 5 |
| 4 | 15,83 | 9 | 15,56 | 7 |
| 5 | 15,99 | 10 | 15,72 | 8 |
| Сумма рангов |  | **31** |  | **24** |

В соответствии с шагом 4 описанного выше алгоритма, выбираем б**о**льшую из двух ранговых сумм: = 31. Тогда .

Выберем уровень статистической значимости равным 5%: p = 0.05;

Тогда по таблице критических значений U-критерия Манна–Уитни [30] определяем

**Получаем ,- это означает, что на данном уровне значимости гипотеза H0 принимается.**

Расчет U-критерий Манна–Уитни для расходов топлива котлом «К6».

Проведем расчет U-критерий Манна–Уитни для расходов топлива котлом «К6» по данным, приведенным в таблице 4.2.

В таблице 4.4 приведены ранжированные значения расходов топлива котлом «К6» для результатов «I4Plan» и результатов, полученных с помощью разработанной математической модели.

Таблица 4. Ранжированные выборок расхода топлива котлом «К6»

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Расход газа («I4Plan»), [тыс.нм3/час]** | **Ранг «I4Plan»** | **Расход газа (разработанный программный продукт), [тыс.нм3/час]** | **Ранг значений разработанного программного продукта** |
| 1 | 10,41 | 2 | 10,24 | 1 |
| 2 | 11,21 | 4 | 11,03 | 3 |
| 3 | 15,1 | 6 | 14,84 | 5 |
| 4 | 17,5 | 8 | 17,2 | 7 |
| Сумма рангов |  | **20** |  | **16** |

В соответствии с шагом 4 описанного выше алгоритма, выбираем б**о**льшую из двух ранговых сумм: = 20. Тогда .

Выберем уровень статистической значимости равным 5%: p = 0.05;

Тогда по таблице критических значений U-критерия Манна–Уитни [30] получаем

**Получаем ,- это означает, что на данном уровне значимости гипотеза H0 принимается.**

Выводы по сравнительному анализу выборок.

Проведенные выше расчеты позволяют говорить о том, что различия в значениях расхода газа котлами «К4» и «К6» полученных с помощью «I4Plan» и с помощью разработанного программного комплекса являются незначительными, и считать разработанный метод применимым к решению поставленной задачи.

Небольшой процент отклонения данных возникает из-за различия в реализациях математических моделей расхода топлива котлоагрегатами. В частности, при реализации математической модели в «I4Plan» не учитывались регрессионные зависимости от паровой нагрузки на котел следующих параметров:

1. Потери тепла с уходящими газами (*q2*);
2. Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения (*q5*);
3. Температура уходящих газов ();
4. Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах ();
5. Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении ().

## Эксперименты для возможных ситуаций на рынке электроэнергии

Рассмотрим несколько ситуаций, возникновение которых возможно на рынке электроэнергии:

1. Задана паропроизводительность, которую должна обеспечивать очередь котлоагрегатов котельного отделения электростанции. Для работы котлов необходимо закупать как газ, так и мазут. Цены на топливо известны. Необходимо определить оптимальный плановый состав оборудования, а также распределить нагрузку между котлоагрегатами для обеспечения заданной суммарной паропроизводительности. В ходе оптимизации приоритет отдается критериям расхода топлива и финансовым затратам на топливо. Назовем данную ситуацию «Приоритет расхода топлива»;
2. Задана паропроизводительность, которую должно обеспечивать котельное отделение электростанции. В распоряжении имеется достаточное количество одного из видов топлива. Для работы котельного отделения необходимо либо закупать другой вид топлива, либо использовать имеющееся. Цены на топливо известны. Эксперт, работающий с системой, задает приоритет использования некоторого вида топлива с помощью коэффициентов относительной важности критериев оптимизации. Необходимо определить оптимальный плановый состав оборудования, а также распределить нагрузку между котлоагрегатами для обеспечения заданной суммарной паропроизводительности. Назовем данную ситуацию «Приоритет одного из видов топлива»;

Приведем результаты расчетов для каждой из рассмотренных выше ситуаций.

В таблице 4.5 приведено описание аппаратного и программного обеспечения, использовавшегося во время проведения экспериментов.

Таблица 4. Аппаратное и программное обеспечение при проведении эксперимента.

|  |  |
| --- | --- |
| **Компонент** | **Значение** |
| Процессор | Intel Core i5, 2.3Ghz |
| Оперативная память | 8192 Мб |
| Жесткий диск | 500 Gb |
| Видео система | NVIDIA GeForce GT 520M |
| Операционная система | Windows 7 Professional, SP1 |

**Ситуация «Приоритет расхода топлива»:**

В таблице 4.6 описаны значения параметров, использовавшиеся при расчетах ситуации «Приоритет расхода топлива». Значения всех параметров, описываемых тут и далее являются реальными данными, используемыми при расчетах в «I4Plan».

Таблица 4. Значение параметров для ситуации «Приоритет расхода топлива».

|  |  |
| --- | --- |
| **Параметр** | **Значение** |
| Общая паропроизводительность очереди котлоагрегатов | 638 тонн/час |
| Цена на газ | 3482 руб./тыс.нм3 |
| Цена на мазут | 6500 руб./т. |

На рисунке 4.4 представлены результаты оптимизации для ситуации «Приоритет расхода топлива», полученные с помощью разработанного программного комплекса.

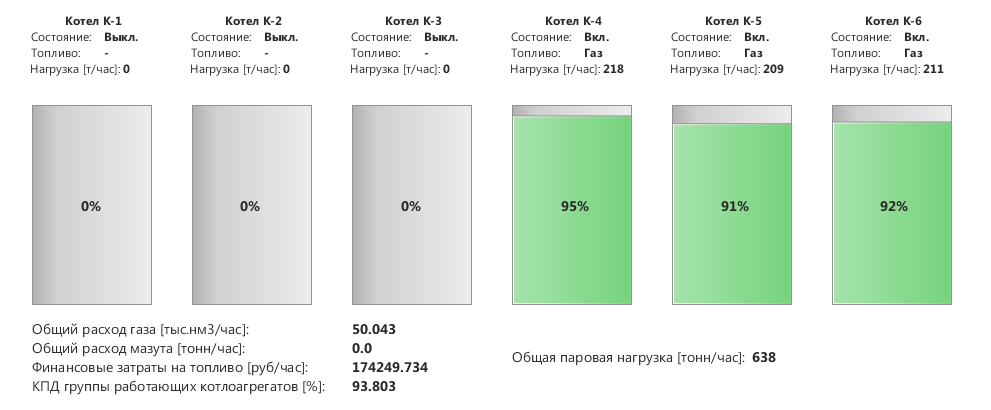
 Как видно из рисунка 4.4, оптимальный плановый состав оборудования для ситуации «Обычная» предполагает распределение общей нагрузки только между котлами «К4», «К5» и «К6». При этом котлы «К1», «К2» и «К3» должны быть выключены. Нагрузка между котлами распределяется почти равномерно, в районе 90% от максимально допустимой паровой нагрузки.

Рис. 4. Результаты оптимизации для ситуации «Приоритет расхода топлива»

Результаты расчетов «I4Plan» с теми же значениями параметров представлены в таблице 4.7.

Таблица 4. Результаты расчетов «I4Plan» для ситуации «Приоритет расхода топлива».

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Котлоагрегат** | **Состояние** | **Паровая нагрузка, [тонн/час]** |
| К1 | Выкл. | 0 |
| К2 | Выкл. | 0 |
| К3 | Выкл. | 0 |
| К4 | Работает на газе | 220 |
| К5 | Работает на газе | 219 |
| К6 | Работает на газе | 219 |

По таблице 4.7 видно, что, аналогично результатам полученным с помощью разработанного программного комплекса, в рабочем состоянии находятся только котлы «К4», «К5» и «К6», причем все они также работают на газе. Однако, распределение паровых нагрузок между котлами отличается.

Выполним расчет для очереди котлоагрегатов с помощью разработанного программного комплекса при паровых нагрузках котлов, взятых из таблицы 4.7. И проведем сравнение значений критериев оптимизации, полученных при паровых нагрузках котлов, вычисленных для ситуации «Приоритет расхода топлива» с помощью разработанного программного комплекса (рисунок 4.4) и паровых нагрузках, вычисленных с помощью «I4Plan» (таблица 4.7). Результаты представлены в таблице 4.8.

Таблица 4. Сравнение значений критериев оптимизации при различных паровых нагрузках.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Режим работы («I4Plan»)** | | **Режим работы (разработанное ПО)** | |
| **Котлоагрегат** | **Состояние** | **Паровая нагрузка, [тонн/час]** | **Состояние** | **Паровая нагрузка, [тонн/час]** |
| К1 | Выкл. | 0 | Выкл. | 0 |
| К2 | Выкл. | 0 | Выкл. | 0 |
| К3 | Выкл. | 0 | Выкл. | 0 |
| К4 | Газ | 220 | Газ | 218 |
| К5 | Газ | 219 | Газ | 209 |
| К6 | Газ | 219 | Газ | 211 |
| **Расход газа, [тыс.нм3/час]** | 50,051 | | **50,043** | |
| **Расход мазута, [тонн/час]** | 0 | | 0 | |
| **Финансовые затраты на топливо, [руб./час]** | 174278,66 | | **174249,73** | |
| **КПД группы котлоагрегатов, [%]** | 93,78 | | **93,803** | |

Как видно из таблицы 4.8, при распределении нагрузок, полученных в результате расчетов, проведенных для ситуации «Приоритет расхода топлива» с помощью разработанного программного комплекса, значения всех критериев оптимизации получились лучше, чем при паровых нагрузках, полученных в результате расчетов с помощью «I4Plan». А именно получаем меньшие значения критериев расхода топлива и финансовых затрат, а также более высокое значение КПД очереди котлоагрегатов. Это позволяет говорить о том, что решение поставленной задачи с помощью разработанного программного продукта является более оптимальным по сравнению с решением, полученным в «I4Plan».

**Ситуация «Приоритет одного вида топлива»:**

Значения параметров, использующихся в ситуации «Приоритет одного вида топлива» совпадают со значениями, описанными в таблице 4.6

При расчетах для данной ситуации будем считать более приоритетным критерий расхода газа по сравнению с другими критериями оптимизации (предполагается, что в распоряжении имеется достаточное количество мазута) и использовать коэффициенты относительной важности критериев. Составим зависимости расходов газа и мазута очередью котлоагрегатов, финансовых затрат на используемое топливо, а также КПД очереди котлоагрегатов от коэффициентов относительной важности расхода газа по отношению к остальным критериям. Результаты приведены в таблице 4.9.

Коэффициенты относительной важности будем менять в пределах от 10% до 90% с шагом равным 10%.

Таблица 4. Зависимости значений критериев оптимизации от коэффициентов относительной важности.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Котел** | **Коэффициент относительной важности, [%]** | **10** | **20** | **30** | **40** | **50** | **60** | **70** | **80** | **90** |
| **К1** | **Состояние** | Г | - | Г | Г | М | М | Г | М | М |
| **Нагрузка, [тонн/час]** | 170 | 0 | 95 | 150 | 128 | 128 | 151 | 98 | 123 |
| **К2** | **Состояние** | Г | Г | Г | Г | М | М | М | - | М |
| **Нагрузка, [тонн/час]** | 169 | 117 | 130 | 149 | 98 | 105 | 119 | 0 | 115 |
| **К3** | **Состояние** | Г | Г | Г | Г | М | М | М | М | - |
| **Нагрузка, [тонн/час]** | 160 | 99 | 120 | 170 | 90 | 92 | 106 | 94 | 0 |
| **К4** | **Состояние** | - | Г | Г | - | - | - | М | Г | М |
| **Нагрузка, [тонн/час]** | 0 | 130 | 130 | 0 | 0 | 0 | 131 | 143 | 131 |
| **К5** | **Состояние** | - | М | М | М | Г | Г | - | М | Г |
| **Нагрузка, [тонн/час]** | 0 | 161 | 163 | 169 | 190 | 182 | 0 | 172 | 138 |
| **К6** | **Состояние** | М | Г | - | - | М | М | М | М | М |
| **Нагрузка, [тонн/час]** | 139 | 131 | 0 | 0 | 132 | 131 | 131 | 131 | 131 |
| **Расход газа, [тыс.нм3/час]** | | 39,29 | 37,6 | 37,45 | 36,9 | 14,84 | 14,3 | 11,9 | 11,25 | 10,8 |
| **Расход мазута, [тонн/час]** | | 9,25 | 10,75 | 10,88 | 11,23 | 29,9 | 30,5 | 32,6 | 33,06 | 33,4 |
| **Финансовые затраты на топливо, [тыс.руб./час]** | | 196,9 | 200,9 | 201,1 | 201,5 | 246,7 | 247,8 | 253,23 | 254,1 | 254,6 |
| **КПД очереди котлоагрегатов, [%]** | | 93,1 | 92,7 | 92,8 | 92,1 | 92 | 92 | 91,7 | 91,8 | 92 |

Построим графики зависимостей значений критериев оптимизации от коэффициентов относительной важности расхода газа по сравнению с другими критериями.

На рисунке 4.5 представлена зависимость значения критерия расхода газа от коэффициента относительной важности газа по отношению к другим критериям.

Как видно из рисунка 4.5, при значении коэффициента относительной важности на интервалах от 10% до 40% и от 50% до 90% идет постепенное уменьшение расхода газа. Резкая смена режимов работы котлоагрегатов происходит при значениях коэффициента относительной важности, лежащих в интервале от 40% до 50%.

Рис. 4. Зависимость значения критерия расхода газа от коэффициента относительной важности расхода газа по отношению к другим критериям.

На рисунке 4.6 представлена зависимость значения критерия расхода мазута от коэффициента относительной важности газа по отношению к другим критериям.

Рис. 4. Зависимость значения критерия расхода мазута от коэффициента относительной важности расхода газа по отношению к другим критериям

Как видно из рисунка 4.6, при значении коэффициента относительной важности на интервалах от 10% до 40% и от 50% до 90% идет постепенное уменьшение расхода мазута. Резкая смена режимов работы котлоагрегатов происходит при значениях коэффициента относительной важности, лежащих в интервале от 40% до 50%, аналогично рисунку 4.5.

Рис. 4. Зависимость финансовых затрат на топливо от коэффициента относительной важности расхода газа по отношению к другим критериям

На рисунке 4.7 представлена зависимость значения критерий финансовых затрат на топливо от коэффициента относительной важности газа по отношению к другим критериям.

Как видно по рисунку 4.7, при значении коэффициента относительной важности на интервалах от 10% до 40% и от 50% до 90% идет постепенное увеличение финансовых затрат на топливо. Резкое увеличение финансовых затрат на топливо происходит при значениях коэффициента относительной важности, лежащих в интервале от 40% до 50%. Это связано с тем, что по мере увеличения значения коэффициента относительной важности критерия расхода газа по сравнению с другими критериями оптимизации котлоагрегаты все больше используют мазут, который значительно дороже газа, и все меньше используют газ.

На рисунке 4.8 представлена зависимость значения критерия КПД очереди котлоагрегатов от коэффициента относительной важности газа по отношению к другим критериям.

Как видно по рисунку 4.8, в целом, при увеличении значения коэффициента относительной важности критерия расхода газа по отношению к другим критериям, происходит снижение КПД очереди котлоагрегатов. Это связано с тем, что по мере увеличения значения коэффициента относительной важности котлоагрегаты все больше используют мазут, и все меньше газ. КПД котлоагрегата, работающего на мазуте меньше КПД этого же котлоагрегата, работающего на газе при одинаковой паровой нагрузке, что подтверждается режимными картами котлов [14].

Рис. 4. Зависимость значения критерия КПД очереди котлоагрегатов от коэффициента относительной важности расхода газа по отношению к другим критериям

Общие выводы по проведенному исследованию

В результате исследования было сделано:

1. Выявлен процент расхождения между значениями расхода газа котлоагрегатами «К4» и «К6» очереди «90 ата» котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго, полученными с помощью «I4Plan», а также с помощью разработанного программного комплекса. Приведено его логическое теоретическое обоснование.
2. Выполнена проверка адекватности разработанного метода, а именно проведено статистическое сравнение двух выборок значений для котлов «К4» и «К6» с помощью U-критерия Манна-Уитни, которое показало, что значения, полученные с помощью разработанного программного комплекса не менее значимы, чем значения, полученные с помощью «I4Plan».
3. Проведен расчет оптимального состава оборудования и распределения нагрузок между работающими котлоагрегатами для двух возможных ситуаций на рынке электроэнергии – «Обычная» и «Приоритет одного вида топлива».
4. Для ситуации «Обычная» проведено сравнение полученных результатов с результатами, полученными с помощью «I4Plan».
5. Для ситуации «Приоритет одного вида топлива» рассмотрен случай с приоритетом критерия расхода газа при различных значений коэффициента относительной важности этого критерия по отношению к другим критериям оптимизации, расположенных в пределах от 10% до 90% с шагом в 10%.
6. Приведены графики зависимостей значений критериев оптимизации от рассмотренного коэффициента относительной важности, а также логическое теоретическое объяснение этих зависимостей.

# Список литературы

1.  Оптимизация режимов работы электроэнергетического оборудования // Точка Роста. — 2012. — http://tochka-rosta.pro/Novosti/optimizatsiya-rezhimov-raboty-e-lektroe-nergeticheskogo-oborudovaniya.html.

2. КРОК Результаты. — М. : КРОК, 2012.

3. Иванов Н.С. Беспалов В.И., Лопатин Н.С. Программный комплекс для оптимизации режимов работы тепловых электростанций и эффективность его применения. — Томск : Известия Томского политехнического университета, 2008. — Т. 313, 4.

4. Иванов Н.С. Беспалов В.И., Лопатин Н.С. Математическая модель оптимизации краткосрочных режимов работы ТЭЦ в условиях конкурентного рынка // Известия Томского политехнического университета. — 2008. — Т. 313, 4. — C. 37-40.

5. А.А. Борисов Программный комплекс для оптимального ведения режима работы теплоэлектроцентрали // Вестник ИГЭУ. — 2008. — 4.

6. E.M.L. Beale Advanced Algorithmic Features for General Mathematical Programming Systems in Integer and Nonlinear Programming. — North-Holland, Amsterdam, 1970.

7. Реклейтис Г. Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2 Т., Т. 1. — М. : Мир, 1986.

8. Kawatatoni T.K. Ullman R.J., Dantzig G.B. Computing Tetraethyl-lead Requirements in Linear Programming Format. — 1960. — Т. 8 : 24-29 c.

9. Cheney E.W. Goldstein A.A. Newton's Method of Convex Programmingand Tchebycheff Approximation. — Numer Math., 1959. — Т. 1 : 253-268 c.

10. D.M. Topkis Cutting Plane Methods without Nested Constraint Sets. — Oper. Res., 1975. — Т. 18 : 404-413 c.

11. Дилигенский Н.В. Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. — М. : Издательство Машиностроение - 1, 2005.

12. G. Ludyk CAE von Dynamischen Systemen. Analyse, Simulation, Entwurf von Regelungssestemen.. — Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 1990. — 335 c.

13. Реклейтис Г. Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2 т.. — М. : Мир, 1986. — Т. 2 : 320 c.

14.  Режимные карты котлоагрегатов очереди 90 ата котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго. — Москва : ЗАО "Крок инкорпорейтед", 2012.

15. И.И.Елисеева М.М.Юзбашев Общая теория статистики. — Москва : Финансы и статистика, 2004. — 656 c.

16. Р.Г. Зах Котельные установки. — М. : Энергия, 1968. — 352 c.

17.  Методические указания по составлению отчета электростанции и АО энергетики и электрийикации о тепловой экономичности оборудования. — М. : Служба передового опыта ОРГРЭС, 1993. — 124 c.

18.  Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций. — М. : Служба передового опыта ОРГРЭС, 1993. — 158 c.

19. В.Д. Ногин Принятие решений в многокритериальной среде. Количественный подход. — М. : Физматлит, 2002.

20. Charns A. Cooper W.W. Management models and industrial applications of linear programming (Appendix B). — N.Y. : John Wiley and Sons, 1961. — Т. 1.

21. Charns A. Cooper W.W., Ferguson R.O. Optimal estimation of execute compensation by linear programming. — Management Science, 1955.

22. М.Е. Салуквадзе О задаче линейного программирования с векторным критерием качества. — Автоматика и телемеханика, 1972. — Т. 5 : 99-105 c.

23. Joe Hicklin Bruce Miller, Karin Remington JAMA Matrix Package. — 2012. — http://math.nist.gov/javanumerics/jama/.

24.  JUnit // JUnit.org. — 2014. — http://junit.org/.

25. Gilbert David JFreeChart // JFree. — 2013. — http://www.jfree.org/jfreechart/.

26. Apache Apache Log4j // Logging Services. — 2014. — http://logging.apache.org/log4j/2.x/.

27.  Oracle. Платформа Java // Oracle. — 2014. — http://www.oracle.com/ru/technologies/java/overview/index.html.

28. Ю.С. Чайкисов Дисперсионный анализ. — Иркутск : Иркутский Государственный Медицинский Университет, 2007.

29. Mann H.B. Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. — Annals of Mathematical Statistics, 1947. — Т. 18 : 50-60 c.

30.  Статистический анализ эмпирических исследований. Критические значения критерия U Манна-Уитни // Аналитическая группа "СтатЭксперт". — 2012. — http://statexpert.org/articles/Статистический анализ эмпирических исследований.