# 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 режимов работы котельного отделения электростанции;
9. разработка программного продукта на основе данного метода;
10. исследование разработанного метода и сравнение результатов с другими известными результатами.

**Входные данные:**

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

Таблица 1.1 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 1.2 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 1.3 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 1.4 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:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | |  | (1.1) | |  |

**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, эмитирующую 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 позволяют 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, подобно 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]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

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.

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