# Исследовательский раздел

В данном разделе описывается анализ адекватности построенной в ходе решения многокритериальной оптимизационной задачи математической модели расхода топлива котлоагрегатом. А также проводится расчет оптимального состава котельного отделения электростанции и нагрузки на котлоагрегаты для нескольких типичных ситуаций на рынке электроэнергии.

Организация процесса исследования предполагает:

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. Выбор трех возможных ситуаций для рынка электроэнергии и проведение расчетов с помощью разработанного программного комплекса для каждой из них;
5. Анализ полученных результатов для выбранных ситуаций и сравнение с имеющимися результатами оптимизации планового состава оборудования на электростанции ТЭЦ-20 Мосэнерго с помощью «I4Plan».

План исследования:

## Анализ адекватности построенной математической модели

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.

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, в состав которой входит бизнес процесс «I4Plan», отвечающий за определение планового состава оборудования и оптимального распределения нагрузок между энергоагрегатами.

Во время эксплуатации этой системы [ссылка] 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 затрат на используемое топливо является крупной финансовой выгодой.

Эти результаты позволяют рассматривать внедренную на ТЭЦ-20 Мосэнерго систему применимой к решению подобного рода задач оптимизации.

### Зависимости расхода газа от паровой нагрузки для котлов «К4» и «К6» очереди «90 ата» котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго

В таблице 5.1 ниже приведены значения расхода газа котлом «К4» очереди «90 ата» котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго при различных значениях паровой нагрузки на котел, значения расхода газа, полученные при тех же нагрузках, вычисленные с помощью разработанной математической модели, а также процент расхождения между значениями.

Таблица 5. Расход газа котлом «К4» в зависимости от паровой нагрузки.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Паровая нагрузка, [тонн/час]** | **Расход газа («I4Plan»), [тыс.нм3/час]** | **Расход газа (разработанная математическая модель), [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 5.1, результаты, полученные с помощью построенной математической модели расхода топлива котлоагрегатом близки к результатам, полученным с помощью программного комплекса «I4Plan». Средний процент расхождения данных составляет 1.74%. На рисунке 5.1 ниже представлены графики зависимостей расхода газа котлом «К4» от паровой нагрузки на котел. А также представлены полиномы третьей степени, аппроксимирующие зависимости расхода газа котлом от паровой нагрузки на котел.

Проанализируем значения расхода газа для котла «К6» очереди «90 ата» котельного отделение ТЭЦ-20 Мосэнерго. В таблице 5.2 ниже 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 разработанной математической модели, а также процент расхождения между значениями.

Рисунок 5. Зависимость расхода газа котлом «К4» от паровой нагрузки.

Таблица 5. Расход газа котлом «К6» в зависимости от паровой нагрузки.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Паровая нагрузка, [тонн/час]** | **Расход газа («I4Plan»), [тыс.нм3/час]** | **Расход газа (разработанная математическая модель), [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 5.2, результаты, полученные с помощью построенной математической модели расхода топлива котлоагрегатом близки к результатам, полученным с помощью программного комплекса «I4Plan». Средний процент расхождения данных составляет 1.69%. На рисунке 5.2 ниже представлены графики зависимостей расхода газа котлом «К6» от паровой нагрузки на котел

Рисунок 5. Зависимость расхода газа котлом «К6» от паровой нагрузки.

На рисунке 5.2 также представлены полиномы третьей степени, аппроксимирующие зависимости расхода газа котлом от паровой нагрузки на котел.

### Оценка различий между значениями «I4Plan» и значениями, полученными с помощью разработанной математической модели

Наборы значений расхода газа для котлов «К4» и «К6», полученные с помощью расчетов в «I4Plan» и разработанной математической модели представляют собой малые независимые выборки данных.

Для оценки различий между выборками будем использовать U-критерий Манна –Уитни[ссылка]. Алгоритм расчета этого критерия приведен ниже.

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 5.1 и 5.2 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.

Проведем расчет U-критерий Манна–Уитни для расходов топлива котлом «К4» по данным, приведенным в таблице 5.1.

В таблице 5.3 приведены ранжированные значения расходов топлива котлом «К4» для результатов «I4Plan» и результатов, полученных с помощью разработанной математической модели.

Таблица 5. Ранжированные выборок расхода топлива котлом «К4»

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Расход газа («I4Plan»), [тыс.нм3/час]** | **Ранг «I4Plan»** | **Расход газа (разработанная математическая модель), [тыс.нм3/час]** | **Ранг значений разработанной мат. модели** |
| 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 [ссылка] получаем

**Получаем , значит на данном уровне значимости гипотеза H0 принимается.**

Проведем расчет U-критерий Манна–Уитни для расходов топлива котлом «К6» по данным, приведенным в таблице 5.2.

В таблице 5.4 приведены ранжированные значения расходов топлива котлом «К6» для результатов «I4Plan» и результатов, полученных с помощью разработанной математической модели.

Таблица 5. Ранжированные выборок расхода топлива котлом «К6»

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Расход газа («I4Plan»), [тыс.нм3/час]** | **Ранг «I4Plan»** | **Расход газа (разработанная математическая модель), [тыс.нм3/час]** | **Ранг значений разработанной мат. модели** |
| 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 [ссылка] получаем

**Получаем , значит на данном уровне значимости гипотеза H0 принимается.**

Проведенные выше расчеты позволяют говорить о том, что различия в значениях расхода газа котлами «К4» и «К6» полученных с помощью «I4Plan» и с помощью разработанной математической модели являются незначительными, и считать разработанную математическую модель применимой к расчету расхода топлива котлоагрегатами.

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

В данном разделе рассматриваются следующие возможные ситуации на рынке электроэнергии:

1. Задана паропроизводительность, которую должно обеспечивать котельное отделение электростанции. Для работы котельного отделения 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 «Обычная»;
2. Задана паропроизводительность, которую должно обеспечивать котельное отделение электростанции. Для работы котельного отделения необходимо в основном закупать газ, так как мазута в распоряжении достаточно. 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 критерию расхода газа. Назовем данную ситуацию «Приоритет расхода газа»;
3. Задана паропроизводительность, которую должно обеспечивать котельное отделение электростанции. Для работы котельного отделения необходимо в основном закупать мазут, так как газа в распоряжении достаточно. 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 критерию расхода мазута. Назовем данную ситуацию «Приоритет расхода мазута»;

Приведем результаты расчетов для каждой из рассмотренных выше ситуаций.

В таблице 5.5 приведено описание аппаратного и программного обеспечения, использовавшегося во время проведения экспериментов.

Таблица 5. 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 «Обычная»:**

В таблице 5.6 описаны значения параметров, использовавшиеся при расчетах ситуации «Обычная». Значения всех параметров, описываемых тут и далее являются реальными данными, взятыми из расчетов «I4Plan».

Таблица 5. Значение параметров для ситуации «Обычная».

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

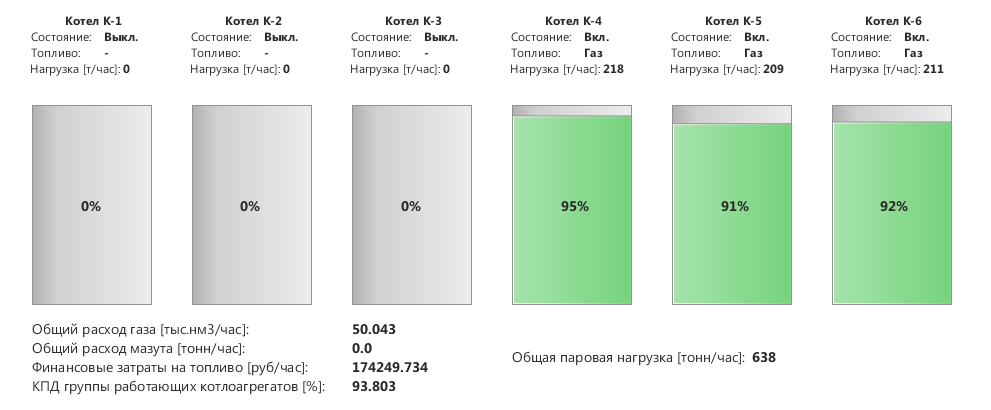
На рисунке 5.3 представлены результаты оптимизации для ситуации «Обычная», полученные с помощью разработанного программного комплекса.

Рисунок 5. Результаты оптимизации для ситуации «Обычная».

Как видно из рисунка 5.3,- 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.

Результаты расчетов «I4Plan» с теми же значениями параметров представлены в таблице 5.7.

Таблица 5. Результаты расчетов «I4Plan» для ситуации «Обычная».

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **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 |

Выполним расчет для очереди котлоагрегатов с помощью разработанного программного комплекса при паровых нагрузках котлов, взятых из таблицы 5.7. И проведем сравнение значений критериев оптимизации, полученных при паровых нагрузках котлов, вычисленных для ситуации «Обычная» с помощью разработанного программного комплекса (рисунок 5.3) и паровых нагрузках, вычисленных с помощью «I4Plan» (таблица 5.7). Результаты представлены в таблице 5.8.

Таблица 5. 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 5.8, при распределении нагрузок, полученных в результате расчетов, проведенных для ситуации «Обычная» с помощью разработанного программного комплекса, значения всех критериев оптимизации получились лучше, чем при паровых нагрузках, полученных в результате расчетов с помощью «I4Plan». 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 расхода газа»:**

Значения параметров, использующихся в ситуации «Приоритет расхода газа» совпадают со значениями описанными в таблице 5.6.

При расчетах для данной ситуации будем использовать коэффициенты относительной важности критериев. В данной ситуации приоритет отдается критерию расхода газа по сравнению с остальными критериями оптимизации. Составим зависимость расхода газа и мазута очередью котлоагрегатов от коэффициентов относительной важности расхода газа по отношению к остальным критериям. Результаты приведены в таблице 5.9.

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

Таблица 5. Зависимости расхода топлива 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 5.4 представлена зависимость значения расхода газа от коэффициента относительной важности газа по отношению к другим критериям.

Рисунок 5. Зависимость расхода газа от коэффициента относительной важности расхода газа по отношению к другим критериям.

Как видно из рисунка 5.4, 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%.

На рисунке 5.5 представлена зависимость значения расхода мазута от коэффициента относительной важности газа по отношению к другим критериям.

Рисунок 5. Зависимость расхода мазута от коэффициента относительной важности расхода газа по отношению к другим критериям.

Как видно из рисунка 5.5, 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 5.4.

На рисунке 5.6 представлена зависимость финансовых затрат на топливо от коэффициента относительной важности газа по отношению к другим критериям.

Как видно по рисунку 5.6, 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.

Рисунок 5. Зависимость финансовых затрат на топливо от коэффициента относительной важности расхода газа по отношению к другим критериям.

На рисунке 5.7 представлена зависимость КПД очереди котлоагрегатов от коэффициента относительной важности газа по отношению к другим критериям.

Как видно по рисунку 5.7, 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[ссылка].

Рисунок 5. Зависимость значения КПД очереди котлоагрегатов от коэффициента относительной важности расхода газа по отношению к другим критериям.