

УДК 621. 311. 22/23

**ОПТИМАЛЬНОЕ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК МЕЖДУ  
АГРЕГАТАМИ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЕЙ  
ПРИ РАБОТЕ НА РЫНКЕ НА СУТКИ ВПЕРЕД**А.М. Клер<sup>1</sup>, А.С. Максимов<sup>1</sup>, А.В. Чалбышев<sup>2</sup>,  
Е.Л. Степанова<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
г. Иркутск<sup>2</sup> Иркутский государственный технический университет,  
г. Иркутск

E-mail: kler@isem.sei.irk.ru

**Клер Александр Матвеевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

E-mail: kler@isem.sei.irk.ru,  
Область научных интересов: математическое моделирование и оптимизационные исследования теплоэнергетических и энерготехнологических установок, тепловых электрических станций и других теплосиловых систем.

**Максимов Алексей Сергеевич**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

E-mail: maxalex@isem.sei.irk.ru  
Область научных интересов: оптимизация режимов работы тепловых электрических станций, математическое моделирование теплоэнергетических установок, разработка программно-вычислительных комплексов.

**Степанова Елена Леонидовна**, канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

E-mail: step@isem.sei.irk.ru  
Область научных интересов: оптимизация режимов работы тепловых электрических станций, надежность функционирования теплоэлектростанций.

**Чалбышев Александр Владимирович**, аспирант Иркутского государственного технического университета.

E-mail: chalbyshev\_av@mail.ru  
Область научных интересов: функционирование электростанций в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности.

В работе рассматривается методика формирования ценовой заявки теплоэлектростанций при работе на рынке на сутки вперед. Цена электроэнергии формируется для трех степеней электрической мощности теплоэлектростанции, которые определяются с учетом оптимального распределения тепловых и электрических нагрузок между агрегатами. Приводится пример формирования ценовой заявки для крупной промышленно-отопительной теплоэлектростанции при прогнозируемом значении тепловой нагрузки теплосети.

**Ключевые слова:**

Теплоэлектростанция, математическое моделирование, оптимизация, рынок электроэнергии.

В настоящее время подавляющее большинство теплоэлектростанций (ТЭС) функционируют в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ). В связи с этим основной задачей для ТЭС является обеспечение конкурентоспособности. Эффективность работы тепловой электростанции при выработке электрической энергии определяется удельным расходом топлива на выработанный кВт·ч. Следует отметить, что одинаковое количество электроэнергии может быть выработано с существенно различными значениями этого показателя. Отсюда возникает задача поиска оптимального (минимально возможного) значения расхода топлива при заданном отпуске тепловой и электрической энергии. Учитывая сложность технологических схем теплоэлектростанций, эффективное решение поставленной задачи возможно лишь с помощью методов математического моделирования и оптимизации, причем математические модели должны максимально подробно описывать действующее оборудование.

Задачам поиска оптимального распределения нагрузок между агрегатами тепловых электрических станций посвящено множество работ как в России, так и за рубежом [1–3]. Отличительной особенностью приведенных работ является использование достаточно простых

моделей основного теплоэнергетического оборудования ТЭС (котло- и турбоагрегатов).

В лаборатории «Исследования энергетических установок» Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН разработана оригинальная методика построения математических моделей сложных теплоэнергетических установок (ТЭУ), которая реализована в виде программно-вычислительного комплекса (ПВК) «Система машинного построения программ» (СМПП) [4]. Использование математических моделей, построенных по этой методике, позволяет проводить конструкторские и поверочные расчеты ТЭУ, основываясь на физических законах и апробированных методах расчета (энергетические и материальные балансы энергоносителей, нормативный метод теплового расчета котла и др.) энергетического оборудования. С помощью этого комплекса можно получать математические модели энергетического оборудования и тепловых электрических станций с достаточно подробной детализацией, учитывая различные особенности в их работе (модернизация оборудования, отключение отдельных элементов и т. д.), а также формировать и решать оптимизационные задачи.

Методики оптимального распределения нагрузок между агрегатами тепловых электростанций представлены в работе [5].

Целью настоящей работы является разработка методики формирования ценовой заявки при работе электростанции на рынке на сутки вперед.

На рынке на сутки вперед (РСВ) осуществляется торговля основной долей вырабатываемой электроэнергии. Участники в рамках единого аукциона, проводимого с учетом электросетевых ограничений, конкурируют за объем выработки/потребления на основе поданных ими ценовых заявок. В результате устанавливаются маржинальная цена (цена РСВ) и соответствующая электрическая мощность каждой электростанции. Ценовая заявка теплоэлектроцентрали, в отличие от всех других электростанций, включает в себя три ступени электрической мощности при заданных значениях потребления тепловой энергии и соответствующих им цен электроэнергии: 1) минимально возможная электрическая мощность; 2) максимальная электрическая мощность при работе по тепловому графику; 3) максимально возможная электрическая мощность. Особо следует выделить первую ступень, так как она является ценопринимающей, т. е. при работе электростанции в данном режиме цена электроэнергии будет равна 0 руб/кВт·ч. Неверное определение значения электрической мощности на данной ступени может привести к существенным убыткам.

Для определения значений электрических мощностей и соответствующих им расходов топлива на каждой ступени решаются следующие оптимизационные задачи:

Первая ступень:

$$N_{ТЭЦ}^{1cm}(x, Q_1, \dots, Q_S) \rightarrow \min ,$$

при ограничениях:

$$H(x, y, Q_1, \dots, Q_S) = 0, \quad (1)$$

$$G(x, y, Q_1, \dots, Q_S) \geq 0, \quad (2)$$

$$x^{\min} \leq x \leq x^{\max} . \quad (3)$$

Вторая ступень:

$$\max_x \frac{N_{ТЭЦ}^{2cm}}{Q_{СТВ}^{ТЭЦ}}$$

при ограничениях (1–3) и

$$Q_{СТВ}^{ТЭЦ} \geq 0 .$$

Третья ступень:

$$\max_x N_{ТЭЦ}^{3cm},$$

где  $x \in E_k$  – вектор независимых оптимизируемых параметров (расходы пара в конденсаторы турбин и пара из регулируемых отборов турбин, давление перед регулирующими диафрагмами турбин, давление пара в пиковых подогревателях сетевой воды и др.);  $y \in E_m$  – вектор зависимых оптимизируемых параметров (расходы острого пара на турбины, расходы пара из нерегулируемых отборов турбин, электрические мощности турбин, давления в нерегулируемых отборах турбин и т.д.);  $N_{ТЭЦ}^{1cm}$ ,  $N_{ТЭЦ}^{2cm}$ ,  $N_{ТЭЦ}^{3cm}$  – полезная электрическая мощность ТЭЦ для первой, второй и третьей ступени соответственно;  $Q_{СТВ}^{ТЭЦ}$  – сброс тепла в систему технического водоснабжения станции;  $Q_i$  – заданная нагрузка  $i$ -го внешнего потребителя тепла;  $S$  – число внешних потребителей тепла;  $H$  –  $m$ -мерная векторная функция ограничений-равенств, включает уравнения, описывающие технологические связи между элементами схемы, энергетические и материальные балансы элементов технологической схемы ТЭЦ и др.;  $G$  –  $l$ -мерная векторная функция ограничений-неравенств (включает ограничения снизу и сверху на такие зависимые параметры, как расходы острого пара на турбины, электрические мощности турбин и др.);  $x^{\min}$ ,  $x^{\max}$  – векторы минимальных и максимальных значений вектора  $x$ .

После нахождения электрических мощностей ( $N_{ТЭЦ}^{1cm}$ ,  $N_{ТЭЦ}^{2cm}$  и  $N_{ТЭЦ}^{3cm}$ ) для каждой из ступеней решается задача поиска минимального расхода топлива котлоагрегатами ТЭЦ, которая формулируется следующим образом:

$$\min_x B_{ТЭЦ}^{cm}(x, y, N_{ТЭЦ}, Q_1, \dots, Q_S)$$

при ограничениях (1–3) и

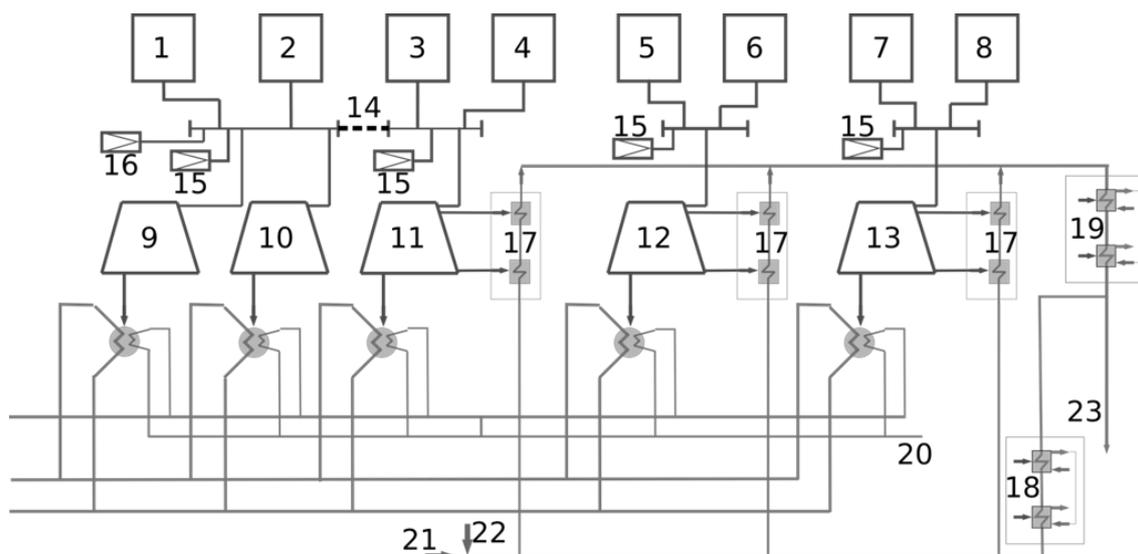
$$N_{ТЭЦ} = N_{ТЭЦ}^{cm},$$

где  $B_{ТЭЦ}^{cm}$ ,  $N_{ТЭЦ}^{cm}$  – суммарный расход топлива котлами и электрическая мощность ТЭЦ на каждой из ступеней.

Решение указанных задач позволяют корректно сформулировать ценовую заявку ТЭЦ.

С использованием предложенной в настоящей работе методики формирования ценовой заявки на рынке на сутки вперед были проведены расчеты для крупной промышленно-отопительной ТЭЦ. Схема рассматриваемой электростанции приведена на рисунке 1.

На ТЭЦ используется обратная система технического водоснабжения с испарительными градирнями. Установленные мощности станции: электрическая – 655 МВт и тепловая – 1147 Гкал/ч. Снабжает потребителей паром с давлением 4,0 и 1,3 МПа. Основным топливом является бурый уголь.



**Рис. 1.** Принципиальная тепловая схема рассматриваемой ТЭЦ: 1–4 – котлоагрегаты БКЗ-420-140; 5–7 – котлоагрегаты БКЗ-500-140; 8 – котлоагрегат БКЗ-820-140; 9, 10 – турбоагрегаты ПТ-60/75-130/13; 11–12 – турбоагрегаты Т-175/210-130; 13 – турбоагрегат Т-185/220-130; 14 – переключатель с ограниченным расходом пара; 15 – РОУ-14/1.3; 16 – РОУ-14/4; 17 – сетевые подогреватели теплофикационных турбоагрегатов; 18 – группа общестанционных подогревателей сетевой воды, греющих паром 0,12 и 1,3 МПа; 19 – группа общестанционных подогревателей сетевой воды, греющих паром 0,3 и 1,3 МПа; 20 – поток воды на деаэраторы подпитки тепловой сети; 21 – обратная сетевая вода; 22 – подпитка тепловой сети; 23 – прямая сетевая вода

Для приведенной схемы были разработаны подробные математические модели турбоагрегатов с расчетом процесса расширения пара в проточной части. Математическая модель ТЭЦ в целом включает более 3000 исходно задаваемых и рассчитываемых параметров, в состав которых входят помимо основных режимных параметров (расходов, температур и давлений) в каждой точке схемы различные коэффициенты как основного, так и вспомогательного оборудования электростанции. Таким образом, обеспечивается возможность настройки математических моделей для более точного описания фактического состояния оборудования станции.

Далее были проведены оптимизационные расчеты по определению трех ступеней электрической мощности при тепловой нагрузке теплосети 797 Гкал/час. Основные результаты расчетов представлены в таблице 1. Ценовая заявка рассчитана с учетом выработки тепловой энергии при стоимости топлива 1510 руб/т у.т. и норме прибыли электростанции 20 %.

**Таблица 1.** Основные результаты расчетов трех ступеней электрической мощности для подачи ценовой заявки на рынке на сутки вперед

Параметр	Ед. изм.	I ступень	II ступень	III ступень
Электрическая мощность ТЭЦ	МВт	384	495	641
ТГ-1	МВт	25	46	52
ТГ-2	МВт	24	45	52
ТГ-3	МВт	90	130	175
ТГ-4	МВт	129	145	175
ТГ-5	МВт	116	129	187
Расход топлива	т у.т./ч	204,6	221,3	280,5
Ценовая заявка	руб/МВт	0	501,0	734,7

### Заключение

В работе предложена методика расчета режимов работы теплоэлектроцентралей с целью формирования ценовой заявки при работе на рынке на сутки вперед. Приведены примеры расчета режимов работы крупной промышленно-отопительной ТЭЦ, в результате которых

сформирована ценовая заявка РСВ. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что предложенная методика может весьма эффективно применяться при работе тепло-электроцентралей на рынке на сутки вперед.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-31622а.*

*Статья рекомендована к публикации по итогам работы V Международной молодежной конференции "Электроэнергетика глазами молодежи 2014".*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макарьян В.А., Черняев А.Н., Андрушин А.В. и др. Программный комплекс распределения нагрузок ТЭЦ со сложным составом оборудования, схемами отпуска тепла и электроэнергии // Теплоэнергетика. – 2013. – № 5. – С. 71–77.
2. Иванов Н.С., Беспалов В.И., Лопатин Н.С. Программный комплекс для оптимизации режимов работы тепловых электростанций и эффективность его применения // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – № 4. – С. 40–44.
3. Stojiljkovic Mirko M., Stojiljkovic Mladen M., Blagojevic Bratislav D. Mathematical modeling and optimization of tri-generation systems with reciprocating engines // Thermal Science. – 2010. – V. 14, br. 2. – P. 541–553.
4. Клер А.М., Деканова Н.П., Тюрина Э.А. Теплосиловые системы: оптимизационные исследования. – Новосибирск: Наука, 2005. – 236 с.
5. Клер А.М., Максимов А.С., Степанова Е.Л., Жарков П.В. и др. Оптимизация режимов работы ТЭЦ с учетом реального состояния основного оборудования // Теплоэнергетика. – 2009. – № 6. – С. 53–57.

Поступила 6.02.2015 г.