

УДК 621.321

ОПТИМАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЭС

УЛАНОВ Д.А., асп., ЖУКОВ В.П., д-р техн. наук, БАРОЧКИН Е.В., канд. техн. наук,
ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В., канд. техн. наук

С использованием математического аппарата теории игр разработан подход к определению оптимальной стратегии генерации электроэнергии на тепловых электростанциях и ее поставок на оптовый рынок электроэнергии и мощности.

An approach to definition of optimal strategy of electric power generation at thermal power plants and its selling on the electric power market based on the mathematical tool of the game theory is developed.

Ключевые слова: тепловая электрическая станция, оптимизация режимов работы, рынок электроэнергии и мощности, теория игр.

Key words: Heat power station, optimization of operating regime, electricity and power market, game theory.

В настоящее время правила функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности во многом определяют стратегию генерации и отпуска энергии от электрических станций. В связи с этим определение условий эффективной работы энергетического оборудования является актуальной теоретической и прикладной задачей энергетики.

Деятельность энергетического предприятия на рынке регламентируется рядом нормативных документов [1, 2]. Основой рынка на сутки вперед (РСВ) является проводимый администратором торговой сети (АТС) конкурентный отбор ценовых заявок на сутки вперед с определением часовых равновесных узловых цен и объемов поставки (покупки). Участниками РСВ подаются заявки на все объемы электрической энергии, которые они планируют произвести (купить) в каждый час следующих суток. На основании результатов конкурентного отбора ценовых заявок на сутки вперед системный оператор планирует режимы работы электроэнергетической системы, поставщиков и покупателей электрической энергии.

Возможность планирования генерации и продажи энергии на суточном рынке делает актуальной задачу выбора оптимальной стратегии составления заявок на РСВ. Для решения задачи предлагается использовать теорию игр. Под игрой понимается порядок рассмотрения заявок администратором сети. Правила рассмотрения заявок определяют правила игры. В качестве игрока выступает энергетическое предприятие, которое производит и продает энергию на рынке. Выбор содержания заявки игроком определяет стратегию его игры. В качестве выигрыша или целевой функции оптимизации выбирается дополнительная прибыль энергетического предприятия от продажи электрической энергии на суточном рынке, в качестве параметров оптимизации – содержание заявки на РСВ.

Заявка включает три ценовые ступени энергии (C_{ij}) и предлагаемый по этой цене объем поставок (N_{ij}) на каждый час следующих суток. Индекс $i = 1 \dots 3$ соответствует номеру ценовой ступени (рис. 1), индекс $j = 1 \dots 24$ показывает час планируемых суток. Две матрицы \mathbf{N} и \mathbf{C} размера 3×24 элементов каждая, по существу, определяют содержание заявки на торги, которую необходимо составить оптимальным образом.

Зависимость выигрыша от продажи электроэнергии (целевой функции) от содержания заявки (параметров оптимизации) записывается следующим образом:

$$P = \sum_{ij} (C_{pj} - C_{ij}) N_{ij}, \quad (1)$$

где индекс «р» соответствует равновесной цене, по которой реализуется энергия.

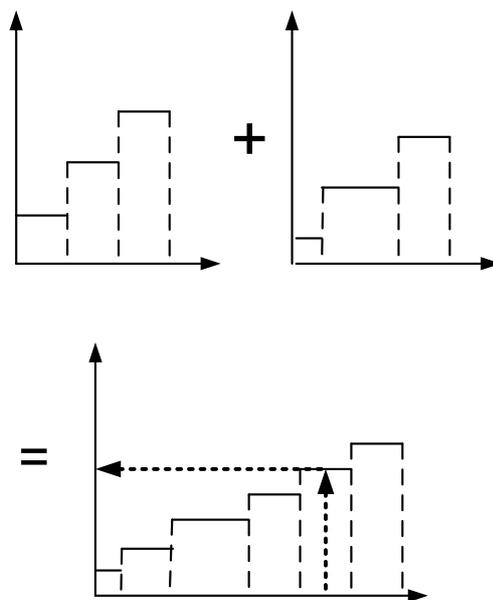


Рис. 1. Схема формирования общей заявки из двух заявок игроков А и В и определение равновесной цены C_p при заданной нагрузке потребителя $N_{\text{потр}}$

Решение задачи выбора оптимальной стратегии выполняется в два этапа, которые будем называть технологическим и рыночным.

На первом (технологическом) этапе решается задача определения оптимального режима работы оборудования с точки зрения минимального потребления топлива или минимальной себестоимости энергии. При этом может варьироваться состав работающего оборудования, запасы и цена топлива. Для каждого анализируемого варианта при оптимальном

с точки зрения технологии режиме работы составляется вариант заявки на РСВ, т. е. определяются матрицы C и N .

На втором (рыночном) этапе прогнозируется поведение вариантов заявки на рынке и установление равновесной цены на энергию (C_p). С использованием теории игр выбирается оптимальный вариант заявки с точки зрения ее реализации на РСВ, обеспечивающий получение максимального выигрыша согласно (1).

Рассмотрим порядок выполнения перечисленных этапов более подробно. На первом этапе выбирается несколько вариантов состава оборудования, работающего, возможно, на разных типах топлива (лимитный и сверхлимитный газ, мазут, твердое топливо). Для каждого варианта решается задача оптимального распределения нагрузки между турбоагрегатами с точки зрения минимизации собственных затрат (себестоимости) на производство заявляемого объема производства энергии.

Задача оптимального распределения нагрузки между турбоагрегатами формулируется следующим образом [3]: оптимально распределить заданную электрическую и тепловую нагрузку между турбоагрегатами для обеспечения минимального суммарного расхода тепловой энергии на выработку электроэнергии:

$$F_{ц} = \sum_{i_1=1}^{n_1} N_{i_1} \cdot q_{тi_1}(Q_{пi_1}, Q_{тi_1}, N_{i_1}) \Rightarrow \min_{Q_{пi_1}, Q_{тi_1}, N_{i_1}}, \quad (2)$$

где Q_p , Q_T – тепловые нагрузки соответственно производственного и теплофикационного отборов пара; N – электрическая нагрузка турбогенератора; q_T – удельный расход тепла брутто на выработку электроэнергии, который определяется по энергетическим характеристикам турбин [6]; n_1 – количество турбоагрегатов, участвующих в распределении нагрузки, индекс « i_1 » – номер турбоагрегата.

Суммарные значения тепловых и электрических нагрузок, которые необходимо распределить, считаются заданными и записываются в виде ограничений:

$$Q_p = \sum_{i_1=1}^{n_1} Q_{пi_1}; \quad Q_T = \sum_{i_1=1}^{n_1} Q_{тi_1}; \quad N = \sum_{i_1=1}^{n_1} N_{i_1}. \quad (3)$$

Суммарная теплофикационная и производственная нагрузки электростанции определяются температурой наружного воздуха и договорными обязательствами перед потребителями. Электрическая нагрузка варьируется в ходе решения задачи с выбранным шагом. Решение сформулированной многомерной оптимизационной задачи (2)–(3) для каждого значения электрической нагрузки выполняется в рамках динамического программирования с использованием алгоритма Беллмана [5] с помощью разработанного программного комплекса «ТЭС-Эксперт» [3]. В ходе решения задачи (2)–(3) находятся оптимальные нагрузки оборудования, которые обеспечивают минимальное потребление топлива.

Результаты оптимального распределения нагрузок на примере ТЭЦ с двумя турбоагрегатами ПТ-

65/75-130/13 представим в виде зависимостей минимального удельного расхода тепла брутто на выработку электрической энергии для станции от суммарной электрической нагрузки при разных значениях теплофикационной нагрузки (рис. 2). Каждая точка на графиках соответствует оптимальному распределению нагрузки между турбинами. Данные зависимости аналогичны энергетическим характеристикам турбоагрегатов [6], но построены для станции в целом. Эта аналогия позволяет называть их энергетическими характеристиками станции. Рассматриваемые характеристики определяются в оперативном режиме с использованием программного комплекса «ТЭС-Эксперт» и позволяют персоналу, при необходимости, оптимально перераспределять нагрузки между агрегатами.

С учетом вида энергетических характеристик электростанции в целом и рентабельности производства составляется вариант ценовой заявки на РСВ. Полученные оптимальные с точки зрения технологии заявки будем называть стратегиями игрока A и обозначать матрицей A , которая получается при простом объединении матриц N и C : $A = [N \ C]$.

Величина ценовых ступеней и их положение определяются, например, включением дополнительного оборудования или переходом на другой тип топлива. Ступени могут также определяться возможностями закупки и перепродажи энергии. Учет перечисленных возможностей приводит к появлению нескольких возможных заявок на РСВ, каждая из которых является оптимальной с технологической точки зрения. Прогнозирование реализации заявки на рынке выполняется на втором (рыночном) этапе решения задачи, в рамках которого с использованием теории игр моделируется рынок.

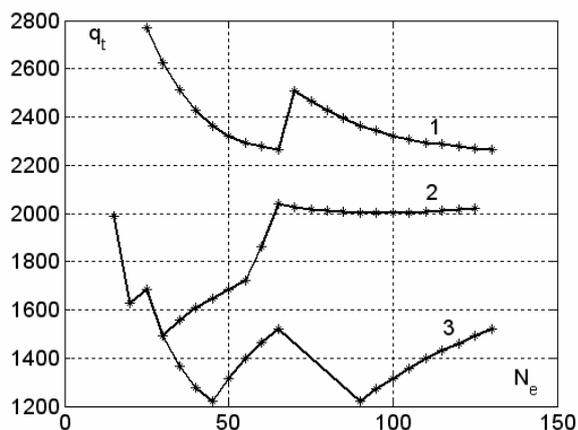


Рис. 2. Примеры оптимальных энергетических характеристик ТЭЦ с двумя турбоагрегатами ПТ-65/75-130/13: 1 – $Q_T = 0$; 2 – $Q_T = 50$ МВт; 3 – $Q_T = 160$ МВт; q_t – минимальный удельный стационарный расход тепла на выработку электрической энергии, ккал/кВт·ч; N_e – электрическая нагрузка ТЭЦ, МВт

Число игроков на реальном рынке составляет несколько десятков единиц, каждый из которых может при подаче заявок руково-

дствоваться своими интересами. Такие игры называются антагонистическими [4]. Рассматривается несколько вариантов постановки игровых задач.

Задача 1. Рассматривается парная антагонистическая игра, в которой участвуют два игрока А и В. Игрок А может реализовывать n (A_1, A_2, \dots, A_n), а игрок В – m (B_1, B_2, \dots, B_m) стратегий, каждая из которых определяется вариантом подачи заявки. Заявки игрока А, в интересах которого рассматривается игра, определяются на первом технологическом этапе решения задачи. Заявки игрока В прогнозируются с учетом обработки имеющейся статистики его заявок.

Для каждой пары стратегий A_i и B_j составляется общая заявка и находится равновесная рыночная цена электроэнергии. Зная запрашиваемую и равновесную цены, согласно (1) вычисляется выигрыш игрока А и заносится в таблицу. Составление таблицы выигрышей называется приведением игры к матричной форме (табл. 1).

Таблица 1. Матрица парной антагонистической игры

	B_1	B_2	B_j	B_m
A_1	a_{11}	a_{12}	a_{1j}	a_{1m}
A_2	a_{21}	a_{22}	a_{2j}	a_{2m}
A_i	a_{i1}	a_{i2}	a_{ij}	a_{im}
A_n	a_{n1}	a_{n2}	a_{nj}	a_{nm}

При выборе оптимальной стратегии воспользуемся принципом минимакса, который обеспечивает максимальный выигрыш из минимально возможных. При наихудшем поведении противника в этом случае можно получить гарантированный выигрыш [4].

Поясним изложенное на примере игры двух игроков при заданной нагрузке потребителя. Пусть игрок А может подать пять вариантов заявки, а игрок В – четыре. Выигрыш предприятия А для разных сочетаний стратегий игроков приведен в табл. 2 (в условных единицах).

Таблица 2. Пример определения минимаксной стратегии парной матричной игры

	B_1	B_2	B_3	B_4	$\min(a_{ij})$
A_1	5	10	2	8	2
A_2	3	5	8	11	3
A_3	5	9	11 _j	4	4
A_4	3	1	5	6	1
A_5	6	3	5	4	3

Для определения оптимальной стратегии в каждой строке находится минимальное значение выигрыша, которое записывается в дополнитель-

Уланов Денис Александрович
Ивановский государственный энергетический университет,
кафедра прикладной математики, аспирант.
Тел. (4932) 38-57-38.
Электронный адрес: zhukov@home.ivanovo.ru

Жуков Владимир Павлович
Ивановский государственный энергетический университет,
кафедра прикладной математики, профессор, доктор технических наук.
Тел. +7-910-680-13-35.
Электронный адрес: zhukov@home.ivanovo.ru

ный столбец. Затем в этом столбце находится максимальное значение, которое и определяет оптимальную стратегию в игре – A_3 .

Задача 2. На реальном рынке число производителей энергии составляет несколько десятков единиц. Для моделирования реального рынка предлагается заменить всех альтернативных производителей одним игроком В с интегральными показателями цены и выработки электроэнергии. Использование такого приема позволяет свести игру к парной игре, решение которой рассматривалось выше.

Задача 3. Следующий интересный и более сложный случай игры имеет место при неизвестном заранее объеме потребляемой на рынке энергии. В данном случае нагрузка потребителя рассматривается как дискретная случайная величина [4] с известным распределением. Для каждого значения дискретной случайной величины (для каждого значения нагрузки потребителя) решается задача, аналогичная рассмотренному примеру. В результате получается распределение оптимальных стратегий с вероятностями, равными вероятностям возможных нагрузок у потребителя. На основании полученных распределений лицо, принимающее решение, должно сделать окончательный выбор заявки.

Использование предложенного алгоритма определения оптимальной стратегии позволяет эффективно строить стратегию подачи заявки на рынке на сутки вперед, обеспечивающую гарантированное получение дополнительной прибыли.

Список литературы

1. **Постановление** Правительства РФ № 643 от 27 октября 2003 г. «О правилах оптового рынка электрической энергии (мощности) переходного периода».
2. **Постановление** Правительства РФ № 109 от 26 февраля 2004 г. «О ценообразовании в отношении электрической и тепловой энергии в РФ».
3. **Программный комплекс «ТЭС-ЭКСПЕРТ»:** опыт оптимизации режимов работы оборудования ТЭС / Е.В. Барочкин, А.А. Поспелов, В.П. Жуков и др. // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 3–6.
4. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004.
5. **Беллман Р.** Динамическое программирование и уравнение в частных производных. – М.: Мир, 1974.
6. **Методические указания** по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций: РД 34.09.155-93. – М.: СПО ОРГРЭС, 1993.

Барочкин Евгений Витальевич
Ивановский государственный энергетический университет,
кафедра тепловых электрических станций,
профессор, доктор технических наук.
Тел. +7-910-982-33-50.
Электронный адрес: admin@tes.ispu.ru

Ледуховский Григорий Васильевич
Ивановский государственный энергетический университет,
кафедра тепловых электрических станций,
доцент, кандидат технических наук
Тел. +7-910-698-99-90.
Электронный адрес: lgv83@yandex.ru