ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УДЕЛЬНЫХ РАСХОДОВ УСЛОВНОГО ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Н.В. Ершов, А.В. Машков

Филиал НИУ «МЭИ» в г. Волжском
404110 г. Волжский, Волгоградская обл., пр. Ленина, д. 69
Тел.: (8443) 210160, факс: (8443) 210166, e-mail: vfmei@vfmei.ru

Заключение совета рецензентов: 03.09.15 Заключение совета экспертов: 06.09.15 Принято к публикации: 09.09.15

В настоящей работе в качестве альтернативы базовому методу расчета фактических и прогнозируемых значений удельных расходов условного топлива (УРУТ) рассмотрена возможность использования методов математической статистики в качестве основы для создания алгоритма прогнозирования УРУТ на ТЭЦ. Предлагаемый метод основан на построении статистических математических моделей расчета прогнозных значений УРУТ в виде соответствующих уравнений нелинейной множественной регрессии и позволяет решить проблемы оперативного прогноза УРУТ в режиме реального времени.

Ключевые слова: удельный расход условного топлива, методы математической статистики, уравнение регрессии.

STUDY THE POSSIBILITY OF PREDICTING SPECIFIC CONSUMPTION OF CONDITIONAL FUEL IN THERMAL POWER PLANTS USING STATISTICAL METHODS

N.V. Yershov, A.V. Mashkov

Volzhsky Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
69 Lenin str., Volzhsky, Volgograd reg., 404110, Russia
Tel.: (8443) 210160, fax: (8443) 210166, e-mail: vfmei@vfmei.ru

Referred: 03.09.15 Expertise: 06.09.15 Accepted: 09.09.15

In this paper, alternatively, the underlying method of calculation of the actual and predicted values of specific consumption of conditional fuel (SCCF), considered the possibility of using the methods of mathematical statistics as the basis for creating the prediction algorithm SCCF in CHP plants. The proposed method is based on the construction of statistical mathematical models of calculation of forecast values SCCF in the respective equations of nonlinear multiple regression and allows to solve problems of operational forecast SCCF in real time.

Keywords: specific consumption of conditional fuel, methods of mathematical statistics, regression equation.

*Никита
Владимирович
Ершов
Nikita V. Yershov*

Сведения об авторе: машинист центрального теплового щита управления паровыми турбинами в ООО «Лукойл-Волгоградэнерго» Волжская ТЭЦ-2.
Образование: ВФ МЭИ.

Information about author: engineer of Central heating control panel steam turbines of "LUKOIL-Volgogradenergo" Volga HPP-2.
Education: Volzhsky Branch of Moscow Power Engineering Institute.

Александр Васильевич
Машков
Alexander V. Mashkov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» ВФ МЭИ.

Образование: Саратовский госуниверситет (1972).

Область научных интересов: нелинейная теория упругости высокоэластических материалов, теория теплопроводности в твердых телах, методы математической статистики в моделировании процессов теплоэнергетики.

Публикации: более 60.

Information about author: Ph.D. (Tech.), associate professor, professor of the Department of «Heat power engineering and heat engineering» Volzhsky Branch of the Moscow Power Engineering Institute.

Education: Saratov State University (1972).

Research area: nonlinear elasticity highly elastic materials, the theory of heat conduction in solids, statistical methods in modeling of the processes of heat and power engineering.

Publications: more than 60.

Введение

В настоящее время работа поставщиков электрической энергии (ТЭЦ или энергосистем) на оптовом рынке электрической энергии и мощности (ОРЭМ) требует оперативной (на сутки, двое или трое вперед) оценки топливной составляющей себестоимости производимой электрической энергии, так как именно по этому критерию из условия минимизации стоимости электрической энергии системным оператором осуществляется выбор поставщиков. Точность прогноза топливной составляющей себестоимости электрической энергии в режиме реального времени является определяющим фактором финансового результата работы ТЭЦ. В свою очередь топливная составляющая себестоимости рассчитывается по величине удельных расходов условного топлива (УРУТ) на производство электрической энергии. Тем самым качество оперативного прогноза величин УРУТ определяет, будет ли принята системным оператором ОРЭМ ценовая заявка ТЭЦ на участие в торгах, а также принесет ли участие в торгах прибыль или убыток.

Анализ

Ошибка в прогнозе УРУТ приводит:

- к необоснованному занижению ценовой заявки от ТЭЦ и продаже энергии по цене ниже относительного прироста стоимости расхода условного топлива, что в итоге приводит к убыткам;

- к ошибочному завышению ценовой заявки, что приводит к снижению конкурентоспособности станции на ОРЭМ, снижению эффекта от продажи электроэнергии и как следствие – к упущенной выгоде.

В качестве базовой методики расчета фактических значений и прогнозирования УРУТ рассматривалась методика определения нормативов УРУТ на ТЭЦ, разработанная фирмой ОРГРЭС и утвержденная Министерством энергетики РФ [1].

Расчет фактических и прогнозируемых значений УРУТ по расчетному макету [1] требует задания дос-

товерных технических характеристик работающего оборудования. Проведенный анализ методики [1] показал, что используемый в ней алгоритм имеет ряд источников погрешностей, связанных с использованием устаревших энергетических характеристик оборудования, погрешностей определения объемов потоков пара и воды в технологической схеме, использованием системы коэффициентов, задаваемых в виде диапазонов их значений, и др.

В настоящей работе в качестве альтернативы базовому методу расчета фактических и прогнозируемых значений УРУТ [1] рассматривается возможность использования методов математической статистики в качестве основы для создания алгоритма прогнозирования УРУТ на ТЭЦ. Предлагаемый метод основан на построении статистических математических моделей расчета прогнозных значений УРУТ в виде соответствующих уравнений нелинейной множественной регрессии и позволяет решить проблемы оперативного прогноза УРУТ в режиме реального времени.

Основными положениями, которые используются в данной работе при построении математических статистических моделей, являются:

- 1) множественный корреляционный анализ для оценки уровня статистической связи между независимыми факторами и параметрами задачи;
- 2) регрессионный анализ для построения уравнений регрессии;
- 3) дисперсионный анализ для оценки адекватности построенных моделей в форме квадратичных уравнений регрессии.

Основными расчетными величинами являются коэффициенты корреляции, коэффициенты полученных уравнений регрессии, а также величины среднеквадратических отклонений, рассчитанных по уравнениям регрессии значений параметров и дисперсии воспроизводимости расчета УРУТ по макету [1].

В настоящей работе для построения уравнений регрессии для УРУТ на производство электрической энергии (b_e) и производство тепловой энергии ($b_{тп}$) используются статистические выборки фактических

данных одной из ТЭЦ. Обработка материалов выборок и все основные расчеты проведены по соотношениям и зависимостям математической статистики, приведенным в работах [2-4].

Результаты и их обсуждение

Построение уравнений регрессии производилось в среде Microsoft Excel. При выборе методологии расчета использовались результаты работ [5, 6].

В качестве расчетных параметров были приняты фактические значения УРУТ на электрическую ($b_э$) и тепловую энергию ($b_{тэ}$). На первом этапе в качестве независимых факторов приняты: выработка электрической энергии по теплофикационному ($\mathcal{E}_{тф}$) и конденсационному ($\mathcal{E}_{кн}$) циклу; отпуск тепловой энергии в паре ($Q_{пар}$) и теплофикационной воде ($Q_{вода}$); вакуум в конденсаторах турбоагрегатов (W); температура циркуляционной воды на входе в конденсатор турбины ($T_{ц.в}$); температуры холодного воздуха ($T_{хол.возд}$) и уходящих газов ($T_{ух.г}$) перед и после котлоагрегата соответственно.

На основе обработки данных выборки были найдены парные коэффициенты корреляции между параметрами и отдельными факторами, а также множественные коэффициенты корреляции между параметрами и парными взаимодействиями факторов. Оценка значимости коэффициентов корреляции проводилась при доверительной вероятности 0,95 по формуле [2]

$$r_{кр} = \frac{t_p}{\sqrt{t_p^2 + n - 2}},$$

где t_p – значение t -критерия Стьюдента, определяемое вероятностью ошибки опыта и объемом выборки данных; n – объем выборки данных.

На основе проведенного корреляционного анализа в уравнения регрессии был введен ряд независимых факторов и их совокупностей. Значения коэффициентов корреляции между $b_э$, $b_{тэ}$ и выбранной совокупностью двух базовых факторов представлены в таблице.

Оценка адекватности полученных уравнений регрессии и результатов расчета достигалась сравнением полученных расчетных значений с фактическими (исходными данными выборок) значениями УРУТ в режиме прогноза. Объем выборки составил 36 значений (среднемесячные значения параметров за 3 года).

По параметру ($b_э$) среднее квадратическое отклонение расчетных данных от фактических составило $\sigma_R = 99,1$. По параметру ($b_{тэ}$) среднее квадратическое отклонение расчетных данных от фактических составило $\sigma_R = 11,3$.

Оценка дисперсии воспроизводимости фактических значений УРУТ по макету [1] принималась при уровне погрешности $\pm 1\%$.

Значения критерия Фишера для ($b_э$) составило $F_{расч} = 2,15$, а для ($b_{тэ}$) – $F_{расч} = 1,19$.

Значения коэффициентов корреляции между $b_э$, $b_{тэ}$, независимыми факторами и совокупностью двух базовых факторов
The values of correlation coefficients between $b_э$, $b_{тэ}$, independent factors and the combination of two basic factors

Независимые факторы	Коэффициент корреляции, r	
	$b_э$	$b_{тэ}$
$\mathcal{E}_{тф}$	0,858	0,849
$\mathcal{E}_{кн}$	0,671	0,611
$Q_{пар}$	0,862	0,859
$Q_{вода}$	0,856	0,849
W	0,593	0,581
$T_{ц.в}$	0,791	0,802
$T_{хол.возд}$	0,82	0,834
$Q_{вода} T_{хол.возд}$	0,806	0,802
$\mathcal{E}_{тф} W$	0,858	0,849
$\mathcal{E}_{тф} T_{ц.в}$	0,829	0,819
$Q_{пар} W$	0,864	0,859
$Q_{пар} T_{ц.в}$	0,839	0,836
$Q_{вода} W$	0,856	0,849
$Q_{вода} T_{ц.в}$	0,835	0,83
$T_{хол.возд} W$	0,811	0,826
$T_{хол.возд} T_{ц.в}$	0,825	0,844

На основе полученных значений критерия Фишера при уровне доверительной вероятности 0,95 можно принять гипотезу, что полученные уравнения регрессии адекватно описывают фактические данные и могут использоваться для прогноза значений ($b_э$) и ($b_{тэ}$).

Сопоставление расчетных, прогнозных и фактических значений удельных расходов условного топлива на производство электрической энергии ($b_э$) приведено на рис. 1.

Рис. 1. Сопоставление значений прогнозных и фактических $b_э$, г/кВт·ч (36 месяцев, 2011-2013 г.)

Fig. 1. A comparison of the forecasted and actual values $b_э$, g/kWh (36 months, 2011-2013)

Максимальное отклонение расчетных значений b_3 от фактических составило $\Delta b_3^{\max} = 7,59\%$.

Среднее отклонение расчетных значений b_3 от фактических за 36 месяцев составило $\Delta b_3^{\text{cp}} = 2,24\%$.

Сопоставление расчетных прогнозных и фактических значений удельных расходов условного топлива на производство электрической энергии ($b_{\text{тэ}}$) приведено на рис. 2.

Рис. 2. Сопоставление значений прогнозных и фактических $b_{\text{тэ}}$, г/Гкал (36 месяцев, 2011-2013 г.)
Fig. 2. A comparison of the forecasted and actual values $b_{\text{тэ}}$, g/Gcal (36 months, 2011-2013)

Максимальное отклонение расчетных значений $b_{\text{тэ}}$ от фактических составило $\Delta b_{\text{тэ}}^{\max} = 5,39\%$.

Среднее отклонение расчетных значений $b_{\text{тэ}}$ от фактических за 36 месяцев составило $\Delta b_{\text{тэ}}^{\text{cp}} = 1,69\%$.

Заключение

Используемые фактические значения УРУТ имеют явно выраженные выбросы [2, 3], положения которых соответствуют периодам отключения и включения теплосети и объясняются нестабильными режимами работы оборудования. В области устойчивых режимов осенне-зимнего максимума нагрузок максимальные выбросы для прогноза УРУТ не превосходят величины 2,5%, что позволяет сделать вывод о возможности и перспективности использования статистического подхода к оперативному прогнозированию УРУТ для ТЭЦ в режиме реального времени для подготовки ценовых заявок на РСВ (рынок «на сутки вперед») и балансирующем рынке.

В то же время из анализа полученных результатов и полученных величин отклонений следует, что для увеличения точности прогнозирования УРУТ целесообразна разработка двух моделей прогноза: для отопительного и неотопительного периодов.

Список литературы

1. Министерство энергетики РФ «Об утверждении порядка определения нормативов удельного расхода топлива при производстве электрической и тепловой энергии». М.: «ОРГРЭС», 2008.
2. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975.
3. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971.
4. Вьюков И.Е., Зорин И.Ф., Петров В.П. Математические модели и управление технологическими процессами целлюлозно-бумажной промышленности // Лесная промышленность. 1975.
5. Машков А.В., Чубко Ю.М. О возможности использования статистических методов для оперативного прогнозирования удельных расходов условного топлива на ТЭЦ // Сборник материалов Межрегиональной научно-практической конференции. Волжский: Филиал ГОУВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском, 2009.
6. Таран А.С. Управление режимами работы ТЭЦ в условиях оптового рынка электроэнергии России // Научный вестник НГТУ. 2012. № 3.

References

1. Ministerstvo ènergetiki RF «Ob utverždenii porâdka opredeleniâ normativov udel'nogo rashoda topliva pri proizvodstve èlektriçeskoj i teplovoj ènergii». M.: «ORGRES», 2008.
2. Kramer G. Matematiçeskie metody statistiki. M.: Mir, 1975.
3. Rumšinskij L.Z. Matematiçeskaâ obrabotka rezul'tatov èksperimenta. M.: Nauka, 1971.
4. V'ûkov I.E., Zorin I.F., Petrov V.P. Matematiçeskie modeli i upravlenie tehnologiçeskimi processami cellûlozno-bumažnoj promyšlennosti // Lesnaâ promyšlennost'. 1975.
5. Maškov A.V., Čubko Ū.M. O vozmožnosti ispol'zovaniâ statistiçeskikh metodov dlâ operativnogo prognozirovaniâ udel'nyh rashodov uslovnogo topliva na TÈC // Sbornik materialov Mežregional'noj naučno-praktiçeskoj konferencii. Volžskij: Filial GOUVPO «MEI (TU)» v g. Volžskom, 2009.
6. Taran A.S. Upravlenie režimami raboty TÈC v usloviâh optovogo rynka èlektroènergii Rossii // Nauçnyj vestnik NGTU. 2012. № 3.

Транслитерация по ISO 9:1995