УДК 621.311.25

Т.В. ПОТАНИНА, ***А.В. ЕФИМОВ***, докт. техн. наук, НТУ «ХПИ»

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА НА ПАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПГВ-1000 ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС С ВВЭР-1000

Розглядається побудова регресійної моделі, що описує залежність паропродуктивності парогенератора ПГВ-1000 від зміни теплових і гідравлічних параметрів теплоносія та робочої речовини. Модель враховує впливи на величину паропродуктивності безпосередньо самих параметрів, а також їхніх взаємодій.

The regression model construction describing of steam generator PGV-1000 charge pair dependence from thermal and hydraulic parameters is considered. In model influences on charge pair parameters, also their interactions are taken into account.

Введение. В современных условиях продолжает оставаться важной проблемой вопрос повышения качества функционирования, надежности и безопасности крупных энергообъектов и, в частности, энергоблоков АЭС. Основные показатели выработки электрической и тепловой энергии зависят от изменяющихся в процессе эксплуатации в результате действия различных факторов параметров и характеристик основного и вспомогательного оборудования энергоблоков. Оценить результат этого воздействия позволяют эксплуатационные характеристики энергоблоков. Они являются исходной информацией при решении задач поиска оптимальных режимов управления работой энергетического оборудования, в том числе и задач оптимального распределения нагрузок между энергоблоками АЭС.

Известно, что решение задач оптимизации подразумевает определение функции цели, достигающей экстремума при оптимальном решении. Как правило, в задачах оптимизации режимов работы энергоблоков, представляющих собой сложные технические системы, функция цели, во-первых, зависит от большого числа параметров, а, во-вторых, находится в условиях су-

щественной неопределенности исходной информации. Возможные причины такой неопределенности следующие: отсутствие, недостаток или запаздывание информации о параметрах работы оборудования во время эксплуатации, погрешности использующихся в практике энергетики измерительных приборов и методов расчетов, пренебрежение в моделях факторами, слабо влияющими на результат и др. Поэтому задача оптимального управления режимов работы энергоблоков формулируется как оптимизационная задача с учетом неопределенности задания исходных данных (информации).

Наиболее часто применяемым и эффективным математическим методом преодоления проблемы неопределенности исходных данных и их описания является статистический подход [1]. В этом случае модель самого объекта или модели интересующих характеристик данного объекта определяются по результатам выборочных экспериментов в условиях действия случайных помех.

В работе [2] с помощью имитационного моделирования были получены эксплуатационные характеристики турбоустановок АЭС мощностью 500 и 1000 МВт, которые описывают влияние изменения параметров основного и вспомогательного оборудования, входящего в состав турбоустановок, на электрическую мощность и экономичность (удельный расход теплоты) выработки электрической и тепловой энергии. Эти характеристики не учитывали влияния изменения параметров работы парогенераторных установок АЭС.

Математическая модель. В данной статье ставится задача построения в виде регрессионного уравнения модели влияния изменения тепловых и гидравлических параметров теплоносителя и рабочего вещества на паропроизводительность (расход пара) горизонтальных парогенераторов ПГВ-1000 энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000.

В качестве параметров были выбраны: температура теплоносителя на входе в парогенератор (ПГ) $t_1'(\tilde{x}_1)$, температура питательной воды $t_{PV}(\tilde{x}_2)$, давление рабочего вещества $p_2(\tilde{x}_3)$ и давление теплоносителя $p_1(\tilde{x}_4)$. Численные однофакторные эксперименты на имитационной модели проводились при условии минимально возможной, не нарушающей нормальный (безопасный) технологический процесс, площади поверхности теплообмена парогенератора $F = 5096\,м^2$. Зависимости относительной паропроизводительности ПГ $\bar{D} = D / D_0$, где $D_0 = 408\,кг/с$ – значение паропроизводительности одного агрегата на номинальном режиме, в каждом их четырех экспериментов были

аппроксимированы полиномами фиксированной степени с использованием метода наименьших квадратов [3]. Функциональные зависимости между $\bar{D}$ и соответствующими параметрами выглядят следующим образом:

1) зависимость от температуры теплоносителя на входе в ПГ (температура питательной воды $t_{PV} = 220^{o}C$, давление рабочего вещества $p_2 = 6,27\ МПа$, давление теплоносителя $p_1 = 15,7\ МПа$)

$$\bar{D}(t_1') = -7,291 + 0,026 t_1', \tag{1}$$

среднеквадратическое отклонение $s = 3,195 \cdot 10^{-4}$;

2) зависимость от температуры питательной воды (температура теплоносителя на входе в ПГ $t_1' = 321^{o}C$, давление рабочего вещества $p_2 = 6,27\ МПа$, давление теплоносителя $p_1 = 15,7\ МПа$)

$$\bar{D}(t_{PV}) = 0,452 + 2,327 \cdot 10^{-3} t_{PV}, \tag{2}$$

среднеквадратическое отклонение $s = 2,635 \cdot 10^{-4}$;

3) зависимость от давления рабочего вещества (температура теплоносителя на входе в ПГ $t_1' = 321^{o}C$, температура питательной воды $t_{PV} = 220^{o}C$, давление теплоносителя $p_1 = 15,7\ МПа$)

$$\bar{D}(p_2) = 2,349 - 0,022 p_2, \tag{3}$$

среднеквадратическое отклонение $s = 9,091 \cdot 10^{-5}$;

4) зависимость от давления теплоносителя (температура теплоносителя на входе в ПГ $t_1' = 321^{o}C$, температура питательной воды $t_{PV} = 220^{o}C$, давление рабочего вещества $p_2 = 6,27\ МПа$)

$$\bar{D}(p_1) = 1,043 - 5,014 \cdot 10^{-3} p_1, \tag{4}$$

среднеквадратическое отклонение $s = 1,31 \cdot 10^{-4}$.

Проанализировав изменение параметра $\bar{D}$ при небольших изменениях значений факторов $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \tilde{x}_4$, можно сделать вывод, что все однофактор-

ные зависимости с достаточной точностью являются линейными. Поэтому возможно, но не очевидно, что поверхность отклика в многофакторном случае не будет иметь существенной кривизны.

Выясним характер зависимости относительной паропроизводительности от изменения всех четырех выбранных факторов: $\bar{D} = F(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \tilde{x}_4)$.

Для получения математической модели функции отклика в виде уравнения регрессии на имитационной модели был проведен активный эксперимент, реализующий матрицу планирования полного факторного эксперимента при наличии четырех вышеупомянутых факторов [3]. При оценке границ факторного пространства учитывались ограничения, связанные с организацией технологического процесса в парогенераторных установках. В качестве основного рассматривался уровень, соответствующий значениям факторов при работе энергоблока в номинальном режиме. Таким образом, уровни факторов, принимают следующие значения: температура теплоносителя на входе в ПГ $\tilde{x}_1 = 317 \pm 2\ ^oC$; температура питательной воды $\tilde{x}_2 = 215 \pm 5^oC$; давление рабочего вещества $\tilde{x}_3 = 6,27 \pm 0,13$ МПа; давление теплоносителя $\tilde{x}_4 = 5,17 \pm 0,03$ МПа. Факторы варьируются на двух уровнях. Может оказаться, что в выбранных интервалах варьирования процесс не будет описываться линейной моделью. Наиболее часто встречающийся вид возникающей нелинейности связан с тем, что эффект одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор, т.е. имеет место эффект взаимодействия факторов. Потому в качестве прогнозируемого уравнения регрессии принимается выражение следующего вида:

$$\begin{aligned}\hat{y} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x_1 + \hat{b}_2 x_2 + \hat{b}_3 x_3 + \hat{b}_4 x_4 + \hat{b}_{12} x_1 x_2 + \hat{b}_{23} x_2 x_3 + \hat{b}_{13} x_1 x_3 + \hat{b}_{24} x_2 x_4 \\ + \hat{b}_{14} x_1 x_4 + \hat{b}_{34} x_3 x_4 + \hat{b}_{123} x_1 x_2 x_3 + \hat{b}_{124} x_1 x_2 x_4 + \hat{b}_{234} x_2 x_3 x_4 + \hat{b}_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4,\end{aligned} \quad (5)$$

где $\hat{y}$ – предсказанное значение функции отклика, x_i – кодированные значения факторов в безразмерном пространстве, $\hat{b}_i$ – оценки коэффициентов. Кодирование факторов выполнялось с помощью преобразований: $x_i = \dfrac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_i^0}{\Delta x_i}$, $i = \overline{1,4}$, где x_1, x_2, x_3, x_4 – кодированные значения факторов, $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \tilde{x}_4$ – натуральные значения факторов, $\tilde{x}_1^0, \tilde{x}_2^0, \tilde{x}_3^0, \tilde{x}_4^0$ – натуральные значения основных уровней факторов.

Матрица планирования полного факторного эксперимента представляет собой план из 16 строк и 16 столбцов (табл. 1), включающий вектор-столбец фиктивной переменной x_0, принимающей во всех опытах значения равные +1. Последний столбец табл. 1 содержит средние значения функции отклика, так как в некоторых точках плана проводилось больше одного опыта.

Таблица 1

Матрица планирования полного факторного эксперимента 2^4

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	…	$x_1x_2x_3x_4$	$\overline{\mathbf{Y}}$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	…	+1	$\overline{y}^1$
2	+1	+1	+1	+1	–1	+1	…	–1	$\overline{y}^2$
3	+1	+1	+1	+1	–1	+1	…	–1	$\overline{y}^3$
…	…	…	…	…	…	…	…	…	
16	+1	–1	–1	–1	–1	+1	…	+1	$\overline{y}^{16}$

Свойства ортогональности, симметричности и нормированности матрицы планирования приводят к следующему выражению для вычисления коэффициентов уравнения (5): $\mathbf{B} = (\mathbf{X^T X})^{-1}\mathbf{X^T}\overline{\mathbf{Y}}$, где $\mathbf{B}$ – вектор-столбец оценок коэффициентов регрессионного уравнения, $\overline{\mathbf{Y}}$ – вектор-столбец средних значений функции отклика, $\mathbf{X}$ – матрица значений факторов, $\mathbf{X^T}$ – транспонированная по отношению к $\mathbf{X}$ матрица.

В табл. 2 представлены результаты расчета оценок коэффициентов $\hat{b}_i$ и их статистической значимости. Табличное значение статистики Стьюдента для данного случая $t_{табл}(16;0,05) = 2,12$. На основании этого значимыми можно объявить коэффициенты $\hat{b}_0, \hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{b}_3, \hat{b}_4, \hat{b}_{12}$. Уравнение (5) примет вид:

$$y(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0,902042 + 0,050542x_1 + 0,011083x_2 - 0,028792x_3 - \\ - 0,011083x_4 + 0,000708x_1x_2. \qquad (6)$$

Согласно критерию Фишера $F_0 = 7340 > 4F_{табл}$ полученное уравнение регрессии с доверительной вероятностью 0,95 адекватно экспериментальным данным. Множественный коэффициент корреляции $R = 0,999963$, то есть

уравнение (6) на 99,9963 % объясняет общий разброс данных относительно среднего $\overline{\mathbf{Y}}$.

Анализ уравнения (7) позволяет сделать вывод об особенностях влияния изменения параметров на паропроизводительность ПГ. Наиболее значительное влияние на расход пара оказывают температура теплоносителя и давление рабочего вещества, также и значимость коэффициента $\hat{b}_{12}$ подтверждает этот факт. Это согласуется и с принятым в практике эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000 регулированием мощности энергоблоков за счет изменения средней температуры теплоносителя.

Таблица 2

Оценки и расчетные значения статистики Стьюдента коэффициентов $\hat{b}_i$

Коэффициент	Оценка	$t_{i\ расч}$	Коэффициент	Оценка	$t_{i\ расч}$
$\hat{b}_0$	0,902042	4501,9	$\hat{b}_{23}$	–0,000333	–1,66
$\hat{b}_1$	0,050542	252,2	$\hat{b}_{24}$	0,000021	0,1
$\hat{b}_2$	0,011083	55,3	$\hat{b}_{34}$	–0,000104	–0,52
$\hat{b}_3$	–0,028792	–143,7	$\hat{b}_{123}$	0,000042	0,21
$\hat{b}_4$	–0,001396	–6,9	$\hat{b}_{124}$	–0,000104	–0,52
$\hat{b}_{12}$	0,000708	3,5	$\hat{b}_{234}$	–0,000021	–0,1
$\hat{b}_{13}$	0,000208	1,03	$\hat{b}_{134}$	0,000146	0,73
$\hat{b}_{14}$	–0,000146	–0,73	$\hat{b}_{1234}$	0,000104	0,52

Выводы. Построенная регрессионная модель позволяет получить эксплуатационные характеристики энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 с учетом влияния изменений работы парогенераторных установок, и таким образом решать широкий круг задач поиска оптимальных режимов управления работой энергообъектов.

Список литературы: 1. *Щедеркина Т.Е., Мерзликина Е.И.* Учет неопределенности исходных данных при решении задач статической оптимизации // Вестник МЭИ. – 2006. – № 3. – С. 22-28. **2.** *Палагин А.А., Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д.* Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок. – К.: Нак. думка, 1991. – 201 с. **3.** *Дрейпер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.