

**ЕНЕРГЕТИКА**  
**ТЕПЛОТЕХНІКА**  
**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА**  
**ENERGETICS**  
**HEAT ENGINEERING**  
**ELECTRICAL ENGINEERING**

УДК 621.039.516

**М.В. Максимов**, д-р техн. наук, проф.,  
**Т.А. Цисельская**, канд. техн. наук,  
Одес. нац. политехн. ун-т

**ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ИМИТАЦИОННОЙ  
МОДЕЛИ ЭНЕРГОБЛОКА С РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000**

*М.В. Максимов, Т.О. Цисельська.* **Перевірка адекватності імітаційної моделі енергоблока з реактором ВВЕР-1000.** Знайдено результати експериментів, які проведені на діючому енергоблоці з реактором ВВЕР-1000. Обрано та обгрунтовано метод перевірки адекватності. Отримано криві розгону по каналах “положення органу регулювання системи управління і захисту — зміна технологічних параметрів” і “витрата пари — зміна технологічних параметрів”. Визначено відносну похибку моделювання по кожній кривій розгону.

*Ключові слова:* адекватність, модель, ВВЕР-1000, орган регулювання системи управління і захисту, витрата пари.

*М.В. Максимов, Т.А. Цисельская.* **Проверка адекватности имитационной модели энергоблока с реактором ВВЭР-1000.** Найденны результаты экспериментов, проведенные на действующем энергоблоке с реактором ВВЭР-1000. Выбран и обоснован метод проверки адекватности. Получены кривые разгона по каналам “положение органа регулирования системы управления и защиты — изменение технологических параметров” и “расход пара — изменение технологических параметров”. Определена относительная погрешность моделирования по каждой кривой разгона.

*Ключевые слова:* адекватность, модель, ВВЭР-1000, орган регулирования системы управления и защиты, расход пара.

*M.V. Maksimov, T.O. Tsiselskaya.* **Validation of a simulation model of a power unit with VVER-1000 reactor.** Validation of a previously developed simulation model is carried out. For conducting the validation the results of experiments carried out on the operating power unit with VVER-1000 are found. The method of checking the adequacy is chosen and proved. Dispersal curves on the channels “position of the regulator body of control-protection system — change of technological parameters”, and “steam charge — change of technological parameters”, are obtained. The modeling relative error on each curve of dispersal is spotted.

*Keywords:* adequacy, model, VVER-1000, regulatory body of “control-protection” system, steam charge.

Имитационная модель объекта должна максимально точно отражать процессы, протекающие в исследуемом объекте. Как правило, созданная модель ориентирована на исследование

определенных свойств объекта. Поэтому адекватность модели определяется не столько степенью ее соответствия объекту, сколько степенью соответствия целям исследования и свойствам, которые для исследования считаются существенными. Математическая модель энергоблока с реактором ВВЭР-1000 была реализована в среде имитационного моделирования Simulink специализированной программы Matlab [1]. Для энергоблока существенными являются следующие технологические параметры: нейтронная мощность реактора, температуры теплоносителя 1-го контура на входе и выходе активной зоны (АКЗ) реактора, средняя температура теплоносителя там же, давление во втором контуре, расход пара из ПГ, электрическая мощность энергоблока.

Формально, при оценке адекватности используют статистические методы и критерии. Следовательно, экспериментальные данные, полученные при исследовании объекта, должны носить статистический характер.

Описаны результаты четырех экспериментов, проведенных на энергоблоке Южноукраинской АЭС с целью определения динамических характеристик основных технологических параметров энергоблока при скачкообразных возмущениях [2].

На энергоблок были нанесены следующие возмущения:

- изменение положения регулирующих клапанов турбины;
- изменение положения регулирующей группы органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ).

Приведенные данные не носят статистический характер, поэтому проверить адекватность статистическими методами не представляется возможным [3].

Учитывая изложенное, принято решение оценить степень расхождения данных, полученных в результате моделирования, с экспериментальными данными, рассчитав относительную погрешность моделирования на рассматриваемом интервале.

Целью статьи является проверка адекватности энергоблока, реализованного в среде имитационного моделирования, энергоблоку, находящемуся в эксплуатации.

**Первый эксперимент.** Возмущение наносилось регулирующей группой ОР СУЗ. Перемещение ОР СУЗ в АКЗ реактора осуществлялось непрерывно, вниз, примерно на 10 % от высоты АКЗ.

Изменение нейтронной мощности  $N_t$  реактора и электрической мощности  $N_r$  энергоблока под действием возмущения, снятые с энергоблока Южноукраинской АЭС (экспериментальная кривая) и полученные в результате моделирования (аналитическая кривая), приведены на рис. 1.

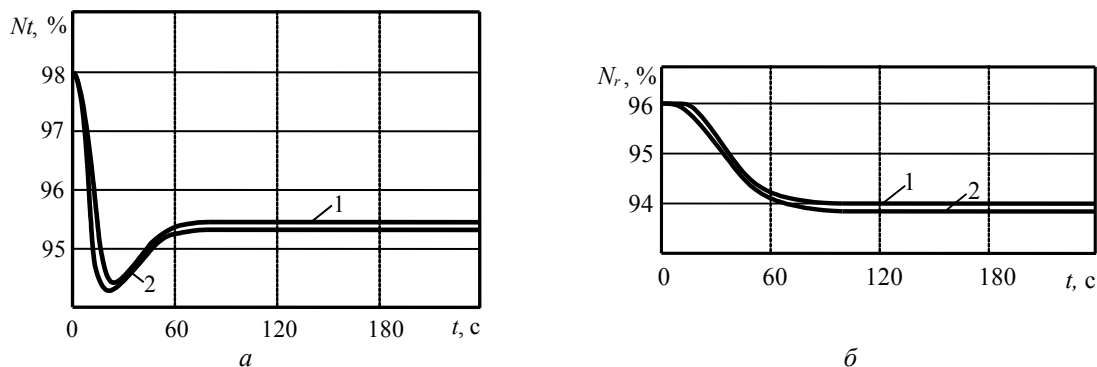


Рис. 1. Влияние регулирующей группы ОР СУЗ, введенной в АКЗ реактора, на: изменение нейтронной мощности реактора (а), изменение электрической мощности энергоблока (б), 1, 2 — экспериментальная и аналитическая кривые, соответственно

Для вычисления относительной погрешности, по осям абсцисс графиков, отображающих отклики технологических параметров на возмущения, отложены равные участки. Величина каждого участка была принята равной 10 с, ввиду того, что рассматривается одинаковый интервал времени, для каждого графика количество участков будет одинаковым. Соответственно количество точек, в которых нужно найти относительную погрешность,  $n = 25$ .

Относительная погрешность

$$\delta_i = \frac{|x_i^a - x_i^э|}{x_i^э},$$

где  $x_i^a$  — значение нейтронной мощности в  $i$ -й точке по аналитической кривой;

$x_i^э$  — значение нейтронной мощности в  $i$ -й точке по экспериментальной кривой.

После определения относительных погрешностей  $i$ -х точек для каждой кривой рассчитаны средняя и максимальная относительные погрешности.

Для  $i$ -х точек аналитической кривой средняя относительная погрешность

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}.$$

Для  $i$ -х точек аналитической кривой, представленной на рисунке 1, *а*, средняя относительная погрешность  $\bar{\delta} = 0,0024$ , а максимальная относительная погрешность  $\delta_{\max} = 0,0092$ .

Для  $i$ -х точек аналитической кривой, представленной на рисунке 1, *б*, средняя относительная погрешность  $\bar{\delta} = 0,0017$ , максимальная относительная погрешность  $\delta_{\max} = 0,0021$ .

**Второй эксперимент.** Возмущение наносилось изменением положения регулирующих клапанов турбины, а именно их частичным закрытием (на 6 % от номинального). Полученные результаты эксперимента представлены на рис. 2.

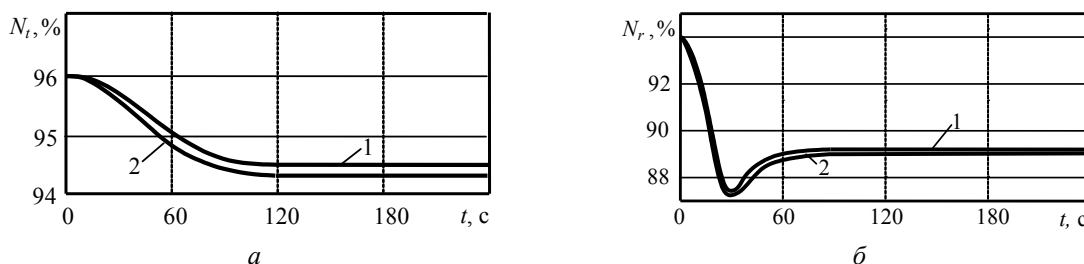


Рис. 2. Влияние прикрытия регулирующих клапанов на изменение: нейтронной мощности реактора (а), электрической мощности энергоблока (б), 1, 2 — экспериментальная и аналитические кривые, соответственно

Для  $i$ -х точек аналитической кривой, представленной на рисунке 2, *а* средняя относительная погрешность  $\bar{\delta} = 0,0019$ , а максимальная относительная погрешность  $\delta_{\max} = 0,0022$ .

Для  $i$ -х точек аналитической кривой, представленной на рисунке 2, *б* средняя относительная погрешность  $\bar{\delta} = 0,0022$ , а максимальная относительная погрешность  $\delta_{\max} = 0,003$ .

По рассчитанным максимальным относительным погрешностям можно определить наибольшую погрешность и среднее из максимальных относительных погрешностей моделирования.

Наибольшая относительная погрешность моделирования из рассчитанных максимальных равна  $\delta_{\max}^v = 0,0092$ , а среднее из максимальных относительных погрешностей моделирования  $\delta_{\text{ср}}^v = 0,0024$ .

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

— Обоснована невозможность оценки адекватности статистическими методами и принято решение оценивать адекватность аналитических данных (полученных посредством моделирования) экспериментально, рассчитывая среднюю и максимальную относительные погрешности каждого из экспериментов и максимальную по всем экспериментам.

— Определено, что наибольшая относительная погрешность моделирования из рассчитанных максимальных равна  $\delta_{\max}^v = 0,0092 = 0,92\%$ , что не превышает точности инженерного расчета.

— По рассчитанным максимальным относительным погрешностям определены наибольшая и среднее из максимальных относительных погрешностей моделирования.

— Определено, что модель отражает поведение энергоблока с максимальной относительной погрешностью не более 0,92 %, что не превышает точность инженерного расчета.

### Литература

1. Максимов, М.В. Модель реактора ВВЭР-1000 как объекта управления / М.В. Максимов, К.В. Беглов, Т.А. Цисельская // Современные технологии управления: Моногр. — Одесса: Изд-во Куприяненко С.В., 2012. — С. 108 — 122.
2. Павлыш, О.Н. Экспериментальные динамические характеристики моноблока 1000 МВт с реактором ВВЭР-1000 / О.Н. Павлыш, И.П. Гарбузов, Ю.Н. Реуков // Электр. станции. 1986. — № 1. С. 8 — 10
3. Айвазян, С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. — М.: Финансы и статистика, 1983. — 471 с.

### References

1. Maksimov, M.V. Model' reaktora VVER-1000 kak objekta upravleniya [A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control] / M.V. Maksimov, K.V. Beglov, T.A. Tsel'skaya // Sovremennye tekhnologii upravleniya [Modern management technologies]: Monogr., Odessa, 2012, — pp. 108 — 122
2. Pavlysh, O.N. Eksperimental'nye dinamicheskie kharakteristiki monobloka 1000 MVt s reaktorom VVER-1000 [Experimental dynamic descriptions of a power unit with VVER-1000] / Pavlysh, O.N., I.P. Garbuzov, Yu.N. Reukov // Electr. stantsii. 1986. — # 1, pp. 8 — 10.
3. Ayvazyan, S.A. Prikladnaya statistika: Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh [Applied statistics: Design framework and initial data processing] / S.A. Ayvazyan, I.S. Yenyukov, L.D. Meshalkin. — Moscow, 1983. — 471 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Ситников В.С.

Поступила в редакцию 5 ноября 2012 г.