

**O. V. YEFIMOV, V. L. KAVERTSEV, T. V. POTANINA, T. A. HARKUSHA, L. I. TIUTIUNYK,  
A. V. MOTOVILNIK**

**METHODS AND APPROACHES TO SIMULATION, DIAGNOSTICS, FORECASTING EQUIPMENT STATE AND OPTIMIZATION OF ROBOT MODES OF NPP POWER UNITS**

Nuclear power plants are the basis of energy in many countries of the world, which determines the pace of their economic development. At the same time, they as complex technological systems are objects of the increased technogenic danger. Therefore, ways to increase the reliability, safety and efficiency of NPP power equipment have already been developed and continue to be developed, which are largely based on diagnostic procedures. During the operation of power equipment, especially during its long period, its technical characteristics, and, consequently, the parameters of technological processes, change under the influence of external factors and as a result of wear, or even destruction, of individual structural elements. Changing the characteristics of the equipment usually leads to a decrease in the level of adequacy and to the loss of conformity of mathematical expressions in the models of the content of the processes described by them. The materials of the article consider the identification of mathematical models of NPP power unit equipment in the process of parametric diagnostics. Ways to increase the reliability, safety and efficiency of NPP power equipment have been developed and continue to be developed, which are largely based on diagnostic procedures. The use of the iterative process to find the values of the identified parameters can be used to identify mathematical models of technological processes in NPP power equipment, which increases the adequacy of models and the reliability of diagnostic conclusions in solving parametric diagnostic problems.

**Keywords:** NPP power units, identification, modeling, diagnostics.

**Introduction.**

The basis of energy in many countries around the world, which determines the pace of their economic development, are nuclear power plants. An NPP power unit with a PWPR-1000 pressurized water reactor is considered as an object of scientific research. This choice is due to the fact that these power units are the basis of the nuclear power industry in Ukraine: out of 15 installed NPP power units with a total capacity of 13,845 MW, 13 are NPP power units with PWPR-1000 (Table 1).

Table 1. Summary table of general data on nuclear power plants in Ukraine

Name nuclear plant	No power unit	A type reactor	Electric power of power unit, MW	Start year exploitation	Year of ending design life
Zapori-zhzhya NPP	1	PWPR-1000/320	1000	1984	2014
	2	PWPR -1000/320	1000	1985	2015
	3	PWPR -1000/320	1000	1986	2016
	4	PWPR -1000/320	1000	1987	2017
	5	PWPR -1000/320	1000	1989	2019
	6	PWPR -1000/320	1000	1995	2025
South-Ukrainian NPP	1	PWPR -1000/302	1000	1982	2012
	2	PWPR -1000/338	1000	1985	2015
	3	PWPR -1000/320	1000	1989	2019
Rivne nuclear plant	1	PWPR - 440/213	415	1980	2010
	2	PWPR - 440/213	420	1981	2011
	3	PWPR -1000/320	1000	1986	2016
	4	PWPR -1000/320	1000	2005	2034
Khmelnitsk NPP	1	PWPR -1000/320	1000	1987	2017
	2	PWPR -1000/320	1000	2005	2034

At the same time, they as complex technological systems are objects of the increased technogenic danger. Therefore, ways to increase the reliability, safety and

efficiency of NPP power equipment have already been developed and continue to be developed, which are largely based on diagnostic procedures.

**Identification of mathematical models of NPP power unit equipment in the process of parametric diagnostics.**

One of such methods is the use of automated systems of parametric diagnostics of power equipment based on mathematical modeling of technological processes as part of the ACS TP power units. Parametric diagnostics allows to establish the factors of deviations of equipment parameters from normal values as a result of changes in its design: certain technical parameters correspond to certain values of parameters.

There are various methods of automated parametric diagnostics of NPP power equipment based on mathematical modeling of technological processes. These are probabilistic methods for assessing the condition of equipment based on the comparison of calculated and normative values of diagnostic parameters [1, 2], methods based on the theory of fuzzy logic within the ideology of expert systems, [3], methods that use linear diagnostic models, [4, 5] and others.

The probability of the results of diagnosing with the help of these methods is largely determined by the level of adequacy of mathematical models of the equipment being diagnosed, the technological processes that take place in it.

However, during the operation of power equipment, especially during its long period, its technical characteristics, and, consequently, the parameters of technological processes, change under the influence of external factors and as a result of wear, or even destruction, of individual structural elements. Changing the characteristics of the equipment usually leads to a decrease in the level of adequacy and to the loss

© Yefimov O.V., Kavertsev V.L., T.V. Potanina, Harkusha T.A., Tiutiunyk L.I., Motovilnik A.V. 2021

of conformity of mathematical expressions in the models of the content of the processes described by them. For example, many of the formulas in the integrated methods of thermal and hydraulic calculations of heat and mass transfer power equipment [1, 6, 7] are obtained experimentally and contain numerical parameters that identify the model and process according to the results of experiments.

Table 2. The general scheme of the article according to the following descriptive algorithm

1	Object of scientific research:	NPP power unit with PWPR-1000 pressure reactor;
2	An object of increased man-made danger:	Complex technological systems for which ways to increase reliability, safety and efficiency have been developed and continue to be developed.
3	The aim of the study:	The problem of identification of mathematical models of equipment of NPP power units in the process of parametric diagnostics is considered.
4	Identification of mathematical models of NPP power unit equipment in the process of parametric diagnostics:	Automated systems of parametric diagnostics of power equipment based on mathematical modeling of technological processes.
5	Methods of automated parametric diagnostics of NPP power equipment:	Probabilistic methods of equipment condition assessment on the basis of comparison of calculated and normative values of diagnostic parameters; methods based on the theory of fuzzy logic within the ideology of expert systems; methods that use linear diagnostic models.
6	Probability of diagnostic results:	The level of adequacy of mathematical models of the diagnosed equipment to technological processes proceeding in it is defined;
7	Mathematical models of technological processes:	Represent a system of nonlinear algebraic equations.
8	Conclusions.	Using the iterative process to find the values of the identified parameters, it is possible to identify mathematical models of technological processes in the power equipment of NPPs, which will increase the adequacy of models, and hence the probability of diagnostic conclusions in solving parametric diagnostics.

However, the design of the diagnosed objects and the values of the parameters of technological processes in them may, as mentioned above, over time differ from the conditions of the experiments in which the corresponding calculation formulas were obtained. Therefore, to increase the reliability of the results of parametric diagnostics, it is necessary to identify mathematical models of processes before diagnosis, in other words, adjust them based on the analysis of measurement results of process parameters in discrete moments preceding the time of diagnosis (Table 2).

In general, mathematical models of technological processes in power equipment, based on integrated methods of calculation [1, 6, 7], are a system of nonlinear algebraic equations:

$$Y = f(X, \Lambda, G), \quad (1)$$

where  $X$  – vector input model;

$\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)^T$  – vector of numerical parameters obtained on the basis of field experiments to identify the process model;

$G$  – vector of the set design characteristics of the equipment;

$Y$  – vector source model data.;

$f = (f_1, f_2, \dots, f_m)^T$  – symbolic record of the functional relationship between  $X, \Lambda, G$  and  $Y$ .

Consider the case of identification of a mathematical model of equipment, when the individual derivatives of vector functions  $f$  on  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  variables can be represented analytically. Suppose that the vector  $Y$  is a vector-column of the measured initial parameters of the technological process  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ . Then, using archival data of measurements of process parameters for the previous period of operation of the equipment, it is possible to calculate average value of a vector.  $Y$ :

$$\bar{Y} = (\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_m)^T. \quad (2)$$

Substituting these values in (1), we obtain  $m$  equations for numerical parameters  $\lambda_j, j = \overline{1, n}$ :

$$\left. \begin{aligned} \bar{y}_1 &= f_1(X, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, G) \\ \bar{y}_2 &= f_2(X, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, G) \\ \dots \dots \dots \\ \bar{y}_m &= f_m(X, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, G) \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

If in (3)  $m = n$ , that is, when the number of equations is equal to the number of identified parameters  $\lambda_j, j = \overline{1, n}$ , the solution of the system of nonlinear equations can be found by standard methods of

computational mathematics, for example, by the modified Newton's method [8, 9]:

$$\Lambda_{k+1} = \Lambda_k - W^{-1}(\Lambda_0) \cdot f(X, \Lambda_k, G), \quad (4)$$

where  $\Lambda_k = (\lambda_1^{(k)}, \lambda_2^{(k)}, \dots, \lambda_n^{(k)})^T$ ,

$$\Lambda_0 = (\lambda_1^{(0)}, \lambda_2^{(0)}, \dots, \lambda_n^{(0)})^T = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)^T,$$

$k$  – iteration number,

$W^{-1}(\Lambda_0)$  – matrix inverse to the Jacobi matrix

$W(\Lambda_0)$ :

$$W(\Lambda_0) = f'(\Lambda_0) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \lambda_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \lambda_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_n} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

For the case when the number of equations is less than the number of identified parameters  $\lambda_j, j = \overline{1, n}$ , such an approach has been developed. Instead of a matrix  $W(\Lambda_0) = f'(\Lambda_0)$  the matrix is considered  $W_1(\Lambda_0)$ , consisting of absolute values of the matrix  $W$ :

$$W_1(\Lambda_0) = |f'(\Lambda_0)| = \begin{pmatrix} \left| \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_1} \right| & \left| \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_2} \right| & \dots & \left| \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_n} \right| \\ \left| \frac{\partial f_2}{\partial \lambda_1} \right| & \left| \frac{\partial f_2}{\partial \lambda_2} \right| & \dots & \left| \frac{\partial f_2}{\partial \lambda_n} \right| \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left| \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_1} \right| & \left| \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_2} \right| & \dots & \left| \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_n} \right| \end{pmatrix}. \quad (6)$$

### Список літератури

1. Єфімов О.В., Пилипенко М.М., Потаніна Т.В., Каверцев В.Л., Гаркуша Т.А. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, матеріали, конструкції, моделі [текст] / за ред. О.В. Єфімова – Харків: ТОВ «В справі», 2017. – 420 с.
2. Аналіз сучасних методів і підходів до математичного моделювання та оптимізації параметрів технологічних процесів в енергетичному устаткуванні енергоблоків ТЕС і АЕС / О.В. Єфімов, Л.І. Тютюник, В.Л. Каверцев, Т.А. Гаркуша, А.В. Мотовільник, П.В. Ліфшиць / Вістник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових дослідженнях студентів. 2020. №6, с. 49–53.
3. Экспертные системы. Принцип работы и примеры/ Брукинг А., Джонс Р., Кокс Ф. и др. Под редакцией Форсайта Р. // М.: Радио и связь, 1987. – 547 с.
4. Зарицкий С.П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / С.П. Зарицкий. М.: Недра, 1987. 198 с.
5. Ефимов А.В. Метод построения диагностических моделей оборудования энергоустановок / А.В. Ефимов, С.Л. Зевин, Адель Аль-Тувайни // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ». – 2002. – Вып.13. – С.153-157.
6. Каневец Г.Е. Обобщенные методы расчета теплообменников / Г.Е. Каневец. – К.: Наукова думка, 1979. – 352 с.
7. Шкловер Г.Г. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин / Г.Г. Шкловер, О.О. Мильман. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 270 с.
8. Воеводин В.В. Матрицы и вычисления / В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 320 с.
9. Демидович Б.П. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. – 664 с.

Using a matrix  $W_1(\Lambda_0) = |f'(\Lambda_0)|$ , a square Jacobi matrix is formed  $W_2(\tilde{\Lambda}_0)$  dimension  $m_1 \times m_1$ , whose columns contain elements with the maximum values of the modules of the derivatives  $\max_{i,j} \left| \frac{\partial f_i}{\partial \lambda_j} \right|$ ,  $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$ , and the determinant is not equal to zero.

With  $m_1 \leq m$  i  $\Lambda_0 = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{m_1})^T$  (taking into account the corresponding change in the numbering of parameters  $\lambda_j$ ). That is, in this case, the identification of the model of technological processes is carried out using a matrix  $W_2(\tilde{\Lambda}_0)$ .

At  $m > n$ , that is, when the number of equations is greater than the number of identified parameters  $\lambda_j, j = \overline{1, n}$ , a similar approach is used as for the case  $m < n$ , with the only difference being the matrix  $W_2(\tilde{\Lambda}_0)$  are formed from the matrix term  $W(\Lambda_0) = f'(\Lambda_0)$ .

If derivatives  $\frac{\partial f_i}{\partial \lambda_j}$  in the Jacobi matrix it is

difficult to calculate in analytical form, it is possible to use existing software implementations of models (1) [1, 2] and with their help to calculate derivatives approximately by the formula:

$$\frac{\partial f_i}{\partial \lambda_j} \approx \frac{1}{2\Delta\lambda_j} (f(X, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j + \Delta\lambda_j, \dots, \lambda_n, G) - f(X, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j - \Delta\lambda_j, \dots, \lambda_n, G)) \quad (7)$$

### Conclusions.

Thus, using the iterative process to find the values of the identified parameters, it is possible to identify mathematical models of technological processes in NPP power equipment, which will increase the adequacy of models, and hence the probability of diagnostic conclusions in solving parametric diagnostics.

## References (transliterated)

1. Yefimov O.V., Pilipenko M.M., Potanina T.V., Kavertsev V.L., Harkusha T.A. Reactors and steam generators of NPP power units: schemes, processes, materials, structures, models [text] / ed. O.B. Yefimova – Kharkiv: LLC «In business». 2017. – 420 p.
2. Analysis of modern methods and approaches to mathematical modeling and optimization of process parameters in power equipment of TPP and NPP power units / O.B. Yefimov, LI Tiutiunyk, V.L. Kavertsev, T.A. Harkusha, A.V. Motovilnik, PV Lifshys / Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative research in student research. 2020. №6, pp. 49–53.
3. Expert systems. Principle of operation and examples / Brooking A., Jones R., Cox F. et al. Edited by Forsythe R. // M.: Radio and communication, 1987. - 547 p.
4. Zaritsky S.P. Diagnostics of gas-pumping units with a gas turbine drive / S.P. Zaritsky. - M.: Nedra, 1987. -- 198 p.
5. Efimov A.V. Method of constructing diagnostic models of power plant equipment / A.V. Efimov, S.L. Zevin, Adel Al-Tuwayni // Bulletin of NTU «KhPI». Kharkov: NTU «KhPI». 2002. – Issue 13, pp. 153–157.
6. Kanevets G.E. Generalized methods of calculating heat exchangers / G.E. Kanevets. – K.: Naukova Dumka, 1979. 352 p.
7. Shklover G.G. Research and calculation of condensation devices for steam turbines / G.G. Shklover, O.O. Milman. - M.: Energoatomizdat, 1986. – 270 p.
8. Voevodin V.V. Matrixes and calculations / V.V. Voevodin, Yu.A. Kuznetsov. – M.: Main edition of physical and mathematical literature, 1984. -- 320 p.
9. Demidovich B. P. Fundamentals of Computational Mathematics / B.P. Demidovich, I.A. Maroon. – M.: Science. Ch. ed. phys-mat. lit., 1970. – 664 p.

Надійшла (received) 19.05.2021

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Єфімов Олександр Вячеславович (Efimov Alexander Vyacheslavovich)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3300-7447>;

e-mail: [AVEfimov22@gmail.com](mailto:AVEfimov22@gmail.com)

**Каверцев Валерій Леонідович (Kavertsev Valery Leonidovich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9472-1658>;

e-mail: [kavertseff@gmail.com](mailto:kavertseff@gmail.com)

**Потаніна Тетяна Володимирівна (Potanina Tetiana Volodymyrivna)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8216-7901>;

e-mail: [Tetiana.Potanina@khpi.edu.ua](mailto:Tetiana.Potanina@khpi.edu.ua)

**Гаркуша Тетяна Анатоліївна (Harkusha Tetyana Anatoliivna)** – науковий співробітник кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

e-mail: [lara.tyutyunik@gmail.com](mailto:lara.tyutyunik@gmail.com)

**Тютюник Лариса Іванівна (Tyutyunik Larisa Ivanivna)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3128-497X>;

e-mail: [lara.tyutyunik@gmail.com](mailto:lara.tyutyunik@gmail.com)

**Мотовільник Анастасія Вадимівна (Motovilnik Anastasiia Vadimovna)** – аспірантка, кафедра парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

e-mail: [lara.tyutyunik@gmail.com](mailto:lara.tyutyunik@gmail.com)

**О. В. ЄФІМОВ, В. Л. КАВЕРЦЕВ, Т. В. ПОТАНИНА, Т. А. ГАРКУША, Л. І. ТЮТЮНИК,  
А. В. МОТОВІЛЬНИК**

### **МЕТОДИ І ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ, ДІАГНОСТИКИ, ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ УСТАТКУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС**

У статті розглянута проблема ідентифікації математичних моделей устаткування енергоблоків АЕС в процесі параметричної діагностики. Основою енергетики в багатьох країнах світу, яка зумовлює темпи їх економічного розвитку, є атомні електростанції. В той же час, саме вони як складні технологічні системи є об'єктами підвищеної техногенної небезпеки. Тому вже розроблені і продовжують розроблятися способи підвищення надійності, безпеки та ефективності енергетичного устаткування АЕС, які, в значній мірі, спираються на діагностичні процедури. Одним з таких способів є застосування в складі АСУ ТП енергоблоків АЕС автоматизованих систем параметричної діагностики енергетичного устаткування, заснованих на математичному моделюванні технологічних процесів. Параметрична діагностика дозволяє встановити чинники відхилень параметрів устаткування від нормальних значень в результаті появи змін в його конструкції: певним значенням параметрів відповідають певні технічні стани. Існують різні методи автоматизованої параметричної діагностики енергетичного устаткування АЕС, що базуються на математичному моделюванні технологічних процесів. Вірогідність результатів діагностування за допомогою цих методів багато в чому визначається рівнем адекватності математичних моделей устаткування, що діагностується, тим технологічним процесам, які протікають в ньому. Застосування ітераційного процесу для знаходження значень ідентифікованих параметрів можна застосувати для здійснення ідентифікації математичних моделей технологічних процесів в енергетичному устаткуванні АЕС. Це дозволяє підвищити адекватність моделей й вірогідність діагностичних висновків при вирішенні задач параметричної діагностики.

**Ключові слова:** енергоблоки АЕС, ідентифікація, моделювання, діагностика.

**А. В. ЕФИМОВ, В. Л. КАВЕРЦЕВ, Т. В. ПОТАНИНА, Т. А. ГАРКУША, Л. И. ТЮТЮНИК, А. В.  
МОТОВИЛЬНИК**

### **МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ, ДИАГНОСТИКЕ, ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РОБОТЫ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС**

В статье рассмотрена проблема идентификации математических моделей оборудования энергоблоков АЭС в процессе параметрической диагностики. Основой энергетики во многих странах мира, обуславливающей темпы их экономического развития, являются атомные электростанции. В то же время, именно они как сложные технологические системы являются объектами повышенной техногенной опасности. Поэтому уже разработаны и продолжают разрабатываться способы повышения надежности, безопасности и эффективности энергетического оборудования АЭС, которые в значительной степени опираются на диагностические процедуры. Одним из таких способов является применение в составе АСУ ТП энергоблоков АЭС автоматизированных систем параметрической диагностики энергетического оборудования, основанных на математическом моделировании технологических процессов. Параметрическая диагностика позволяет установить факторы отклонений параметров оборудования от нормальных значений в результате появления изменений в его конструкции: определенным значениям параметров соответствуют определенные технические состояния. Существуют различные методы автоматизированной параметрической диагностики энергетического оборудования АЭС, основанных на математическом моделировании технологических процессов. Достоверность результатов диагностирования с помощью этих методов во многом определяется уровнем адекватности математических моделей диагностируемого оборудования, тем технологическим процессам, которые протекают в нем. Применение итерационного процесса для нахождения значений идентифицированных параметров можно применить для осуществления идентификации математических моделей технологических процессов в энергетическом оборудовании АЭС. Это позволяет повысить адекватность моделей и достоверность диагностических выводов при решении задач параметрической диагностики.

**Ключевые слова:** энергоблоки АЭС, идентификация, моделирование, диагностика.