

T. V. POTANINA, O. V. EFIMOV

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ІНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС

Державна програма продовження терміну експлуатації енергоблоків АЕС України та нормативні документи підкреслюють важливість розробки методів підвищення достовірності оцінки показників безпеки, надійності і ефективності експлуатації систем і устаткування енергоблоків атомних електростанцій. Для модернізації систем керування енергетичними об'єктами і забезпечення точності прийнятих персоналом рішень необхідна розробка моделей процесів і устаткування, які враховують численні чинники невизначеності вхідних і вихідних даних, неточності вимірювань. Розглянуто визначення експлуатаційних (енергетичних) характеристик одного із значущих елементів вологопарових турбін енергоблоків АЕС – сепаратора-пароперегрівника: побудова залежності температури пари, що нагрівається, на виході з першого ступеня від навантаження енергоблоку. Представлено нелінійну модель такої залежності, коефіцієнти якої визначено за допомогою методу мінімізації Левенберга-Марквардта. Наявність нестатистичного характеру похибок вимірювань і невизначеностей в експериментальних даних робить некоректним застосування класичних статистичних методів. Розглядається ситуація обмеженості похибки без вірогідної інформації про її розподіл. Для оцінювання коефіцієнтів емпіричної залежності, що конструюється за результатами експериментальних даних, пропонується застосування чисельних методів інтервального аналізу. Описано теоретичну суть кроків інтервального оцінювання та математичний апарат, що дозволяє побудувати інтервальну модель. Здійснено перехід до лінійної моделі, параметри якої – інтервали, що є мінімальними зовнішніми оцінками інформаційної множини параметрів. Інтервальний підхід дозволяє побудувати уточнену трубку, яка гарантовано містить припустимі залежності температури пари, що нагрівається від електричної потужності енергоблоку. В ситуації невизначеності даних та обмеженості похибок чисельні методи інтервального аналізу дозволяють створювати моделі процесів та устаткування енергоблоків атомних електростанцій з максимально можливою їх відповідністю реальному об'єкту.

Ключові слова: обладнання енергоблоків АЕС, експлуатаційні характеристики, невизначеність, обробка експериментальних даних, нестатистичні похибки вимірювань, інтервальний аналіз, інтервальна модель.

T. V. POTANINA, A. V. EFIMOV

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

Государственная программа продления срока эксплуатации энергоблоков АЭС Украины и нормативные документы подчеркивают важность разработки методов повышения достоверности оценки показателей безопасности, надежности и эффективности эксплуатации систем и оборудования энергоблоков атомных электростанций. Для модернизации систем управления энергообъектами и обеспечения точности принимаемых персоналом решений необходима разработка моделей процессов и оборудования, учитывающих многочисленные факторы неопределенности исходных и выходных данных, неточности измерений. Рассмотрено определение эксплуатационных (энергетических) характеристик одного из значимых элементов влажнопаровых турбин энергоблоков АЭС – сепаратора-пароперегревателя: построение зависимости температуры нагреваемого пара на выходе из первой ступени от изменяющейся нагрузки энергоблока. Представлена нелинейная модель такой зависимости, коэффициенты которой определены с помощью метода минимизации Левенберга-Марквардта. Наличие нестатистического характера погрешностей измерений и неопределенностей в экспериментальных данных делают некорректным применение классических статистических методов. Рассматривается ситуация ограниченности погрешности без достоверной информации о ее распределении. Для оценивания коэффициентов эмпирической зависимости, конструируемой по результатам экспериментальных данных, предлагается применение численных методов интервального анализа. Представлена теоретическая суть шагов интервального оценивания и математический аппарат, позволяющий построить интервальную модель. Осуществлен переход к линейной модели, параметры которой представляют собой интервалы, являющиеся минимальными внешними оценками информационного множества параметров. Интервальный подход позволяет построить уточненную трубку, гарантированно содержащую допустимые зависимости температуры нагреваемого пара от электрической мощности энергоблока. В ситуации неопределенности данных и ограниченности ошибок численные методы интервального анализа позволяют создавать модели процессов и оборудования энергоблоков атомных электростанций с максимально возможным их соответствием реальному объекту.

Ключевые слова: оборудование энергоблоков АЭС, эксплуатационные характеристики, неопределенность, обработка экспериментальных данных, нестатистические погрешности измерений, интервальный анализ, интервальная модель.

T. POTANINA, O. YEFIMOV

APPLICATION OF INTERVAL ANALYSIS METHOD FOR DETERMINING OPERATING CHARACTERISTICS OF NPP POWER UNITS

The state program for extending the life of power units of Ukrainian NPPs and regulatory documents emphasize the importance of developing methods to increase the reliability of evaluating safety indicators, reliability and operational efficiency of systems and equipment of nuclear power plants. To modernize power facility management systems and ensure the accuracy of decisions made by personnel, it is necessary to develop models of processes and equipment that take into account the numerous factors of uncertainty in the source and output data, and inaccuracy of measurements. The determination of the operational (energy) characteristics of one of the significant elements of the wet-steam turbines of nuclear power units – the separator-superheater – is considered: namely the construction of the dependence of the temperature of the heated steam at the outlet of the first stage on the changing load of the power unit. A nonlinear model of such a dependence is presented, the coefficients of which are determined using the Levenberg-Marquardt method. Due to non-statistical nature of measurement errors and uncertainties in the experimental data the application of classical statistical methods to the problem considered is incorrect. The situation of error limitation without reliable information about its distribution is considered. To evaluate the coefficients of empirical dependence, constructed according to the results of experimental data, it is proposed to use numerical methods of interval analysis. The theoretical essence of the steps of interval estimation and the mathematical apparatus are presented, which makes it possible to construct an interval model. A transition is made to a linear model, the parameters of which are intervals presenting the minimal external estimates of the membership set of parameters. The interval approach allows building a refined tube, guaranteed to contain acceptable dependences of the temperature of the heated steam on the electric power of the power unit. In a situation of data uncertainty and limited errors,

© T. V. Potanina, O. V. Efimov, 2019

numerical methods of interval analysis allow creating models of processes and equipment of NPP units with the maximum possible correspondence to a real object.

Key words: equipment of NPP power units, operational characteristics, uncertainty, processing of experimental data, non statistical measurement errors, interval analysis, interval model.

Вступ. Вирішення задач підвищення ефективності, надійності і безпеки виробництва електричної та теплової енергії атомними електростанціями, реалізація стратегії довгострокової експлуатації енергоблоків АЕС, проектний термін експлуатації яких закінчився або спливає найближчим часом є для України актуальною та стратегічною проблемою державного рівня, яка безпосередньо пов'язана з енергетикою, енергозбереженням та запобіганням масштабним техногенним катастрофам [1].

В зв'язку з цим постійно зростають вимоги до розробки нових методів аналізу якості й безпеки функціонування теплоенергетичних систем, якими є енергоблоки атомних електростанцій, діагностика і прогнозування надійності устаткування. Це спонукає пошук нових та удосконалення існуючих методів моделювання технологічних процесів з метою визначення надійності та оптимізації їх параметрів, вивчення взаємозв'язку між ними для модернізації систем керування теплоенергетичними об'єктами. Особливого значення набуває застосування цих методів в системах інтелектуальної підтримки в умовах відсутності, значної обмеженості або невизначеності інформації про зміни параметрів технологічних процесів під час експлуатації теплоенергетичних систем.

Постановка задачі. Розглянемо задачу визначення температурних характеристик сепараторів-пароперегрівників (СПП), які є вагомими елементами вологопарових турбін енергоблоків АЕС. Такі характеристики, загалом, описують вплив багатьох різноманітних факторів на температуру пари, що нагрівається, на її виході зі ступеней сепаратора-пароперегрівника. Одним із важливих чинників є режимний фактор, тобто зміна електричної потужності (навантаження).

В нашому розпорядженні знаходяться дані різних експериментів [2] по вимірюванню температури пари t на виході з першої ступені при зміні електричної потужності N енергоблоку в діапазоні 50–100 % (табл. 1). Значення температури були отримані в процесі дослідження при фіксованій потужності енергоблоку і представлені інтервалами, що демонструють мінімальне і максимальне значення.

Таблиця 1

$N, \%$	$t, ^\circ\text{C}$
50	[180,5; 182,8]
60	[187; 187,7]
70	[191,3; 192]
80	[194,2; 195]
90	[196; 196,6]
100	198

Очевидно, що експериментальні дані містять неточності та є невизначеними. Невизначеність

обумовлена похибками вимірювань й округлень, наявністю шуму, неповнотою інформації. Аналіз численних наукових робіт, присвячених обробці експериментальних даних, які характеризуються невизначеністю, свідчить про те, що однією з найбільш коректних моделей, можна вважати інтервальну модель [3–17].

Чисельна інформація, наведена в табл. 1, може бути інтерпретована у графічному вигляді (рис. 1). Ця інформація мотивує розглядати нелінійну модель залежності температури пари у вигляді:

$$t(N, a, b) = a \cdot \ln(N) + b, \quad (1)$$

де N – електричне навантаження енергоблоку (%); $a > 0, 1/\%$, $b > 0, ^\circ\text{C}$ – параметри залежності, які слід визначити.

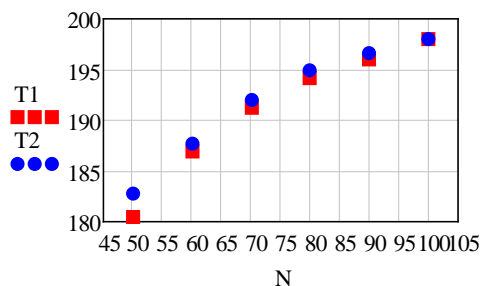


Рис. 1. Дані експерименту: $T1, ^\circ\text{C}$ – мінімальне значення температури та $T2, ^\circ\text{C}$ – максимальне значення температури, зафіксовані при вказаному рівні електричного навантаження $N, \%$ енергоблоку [2]

Застосовуючи стандартні статистичні підходи обробки експериментальних даних [18] і виходячи з того, що залежність не є лінійною функцією, параметри співвідношення (1) визначаємо методом мінімізації Левенберга-Марквардта [19]. Отримуємо рівняння:

$$t = 23,513 \cdot \ln(N) + 90,713, \quad (2)$$

середнє квадратичне відхилення дорівнює $\sigma = 0,824$.

На рис. 2 показано криву (2) та довірчий інтервал шириною $\pm 2\sigma$, який дуже часто застосовується як міра розсіювання даних експерименту, або як допустима за методом найменших квадратів область значень процесу, що досліджується в експерименті. Видно, що не усі значення температури містяться в цьому інтервалі.

Вибірка містить досить обмежену кількість експериментальних точок – лише шість вимірювань, а структура й імовірнісні характеристики похибок вимірювань невідомі. Таким чином, неможливо обґрунтувати застосування стандартних процедур обробки експериментальних даних, що спираються на статистичні методи: представництво вибірки (довжина

має бути достатньо великою), нормальність розподілу похибок вимірювання (похибка має ймовірнісний характер і її розподіл нормальний і незміщений), значення основного аргументу точні.

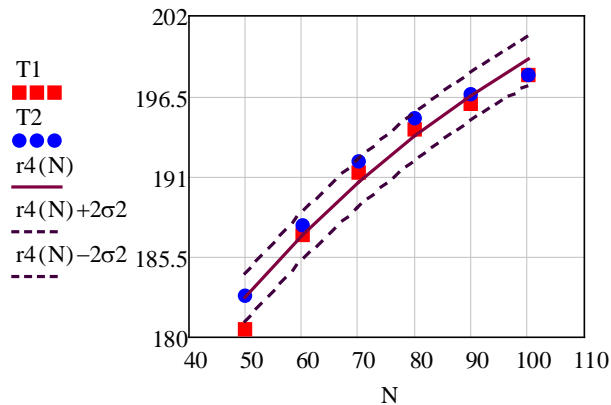


Рис. 2. Експериментальні значення температури та апроксимація даних кривою (2)

В такій ситуації більш повну інформацію про процес залежності температури пари від навантаження може дати застосування чисельних методів інтервального аналізу [20].

Основний матеріал. Значення навантаження припустимо заданими точно, а вимірювання значень температури, як такі, що містять шумові похибки. Термоперетворювачі опору, якими вимірюють температуру теплоносія (пари) на об'єктах атомної енергетики, мають похибку пристрою $\pm (0,15 + 0,002|t|)$ °C або $\pm (0,3 + 0,005|t|)$ °C, в залежності від класу допуску [21]. Для нашого випадку абсолютна похибка вимірювань може становити від 0,5 °C до 1,3 °C, тобто для кожного експериментального значення

$$t_i = \hat{t}_i + e_i, |e_i| \leq e_{\max}, i = 1, \dots, 6, \quad (3)$$

де t_i – результат вимірювання температури пари;

\hat{t}_i – невідоме справжнє значення температури;

e_i – похибка i -го вимірювання,

$e_{\max} = 0,5$ °C (для діапазону температур пари, який не перевищує 300 °C) – обмеження на максимальне значення похибки.

Застосуємо до нелінійної моделі (1) заміну $x = \ln(N)$, тоді відносно нової змінної x залежність має вигляд

$$t(x, a, b) = ax + b, \quad (4)$$

тобто стає лінійною.

В інтервальній моделі неточність або невизначеність вхідного параметра t описується за допомогою інтервалу $[t] = [\underline{t}; \bar{t}]$, де \underline{t} і \bar{t} – відповідно нижня і верхня межі цього проміжку. Інтервал визначає множину можливих значень невідомого істинного параметру t . Особливість інтервального підходу в тому, що на інтервалі $[t]$ не задано жодної ймовірнісної чи нечіткої міри, тобто усі значення t

всередині інтервалу рівноможливі.

В умовах невизначеності обробка експериментальних даних методами інтервального аналізу – це визначення усієї множини значень параметрів a, b , сумісних з набором даних дослідження [21]. Тобто для заданої функції (4), обраної моделі «шуму» (3) з обмеженням e_{\max} та заданої вибірки вимірів температури пари та значень електричної потужності (табл. 1) необхідно побудувати множину припустимих значень a, b , інакше сумісних із заданою вибіркою та заданою величиною e_{\max} на похибку вимірювань. Така множина в термінах інтервального аналізу має назву «інформаційна множина» або «множина сумісних значень».

Розглянемо теоретичну суть кроків інтервального оцінювання та математичні засоби, що застосовуються в цьому процесі.

Для кожного виміру температури пари за допомогою моделі (3) обчислюються нижня \underline{t}_i і верхня \bar{t}_i межі інтервалу невизначеності T_i :

$$T_i = [\underline{t}_i; \bar{t}_i], i = 1, \dots, 6; \underline{t}_i = t_i - e_{\max}; \bar{t}_i = t_i + e_{\max}. \quad (5)$$

Фізичний зміст інтервалу невизначеності – область можливих значень температури пари, яка містить невідому істину вимірювану величину.

Для кожної пари інтервалів T_i і T_j , $i = 1, \dots, 5$, $j = i + 1, \dots, 6$ невизначеності (5) вимірів вибірки обчислюється двовимірна парціальна інформаційна множина $G_{i,j}(a, b)$ параметрів a, b , сумісних з даною парою інтервалів невизначеності: $G_{i,j}(a, b)$, $i = 1, \dots, 5$, $j = i + 1, \dots, 6$.

Наступний крок – визначення інформаційної множини $I(a, b)$ параметрів a, b , сумісних з усією вибіркою вимірів: $I(a, b) = \bigcap_{i=1, \dots, 5, j=i+1, \dots, 6} G_{i,j}(a, b)$.

Дана множина характеризується безумовними мінімальними зовнішніми оцінками – інтервалами параметрів $[a; \bar{a}]$ і $[b; \bar{b}]$. Визначення цих інтервалів здійснюється за правилами:

$$\begin{aligned} [a; \bar{a}] : \underline{a} &= \text{Arg} \{ \min a \in I(a, b) \}, \\ \bar{a} &= \text{Arg} \{ \max a \in I(a, b) \}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [b; \bar{b}] : \underline{b} &= \text{Arg} \{ \min b \in I(a, b) \}, \\ \bar{b} &= \text{Arg} \{ \max b \in I(a, b) \}. \end{aligned} \quad (7)$$

Оскільки ймовірнісні характеристики похибок вимірів невідомі, то для подальшого обчислення «середньої» залежності, що є апроксимацією експериментальних даних, застосовуються середні точки інтервалів (6)–(7): $a_c = 0,5(\underline{a} + \bar{a})$, $b_c = 0,5(\underline{b} + \bar{b})$.

І середня залежність, відповідно, має вигляд:

$$t = a_c x + b_c.$$

На відміну від стандартного способу метода найменших квадратів побудови кривої апроксимації, інтервальный підхід дозволяє побудувати уточнену трубку $\text{Tube}(x)$ гарантованих – припустимих залежностей. Така трубка визначається своїми нижньою $\underline{\text{Tube}}(x_i)$ і верхньою $\overline{\text{Tube}}(x_i)$ межами, які обчислюються за допомогою інформаційної множини наступним способом:

$$\text{Tube}(x) = \left\{ \underline{\text{Tube}}(x_i), \overline{\text{Tube}}(x_i) \right\}, i = 1, \dots, 6,$$

$$\text{де } \underline{\text{Tube}}(x_i) = \min_{(a,b) \in I(a,b)} \{ax_i + b\};$$

$$\overline{\text{Tube}}(x_i) = \max_{(a,b) \in I(a,b)} \{ax_i + b\}.$$

Висновок. При розв'язанні задач оцінки безпеки і надійності систем і устаткування енергоблоків АЕС, а також підвищення ефективності їх експлуатації за рахунок визначення експлуатаційних (енергетичних) характеристик актуальною залишається проблема врахування в об'єктах і процесах, для яких створюються моделі, факторів невизначеності і вибір математичного апарату для їх опису. Класичне «точкове» представлення величин в задачах моделювання та оптимізації найчастіше не дозволяє осягнути максимально можливої відповідності між реальним об'єктом та його моделлю. Ігнорування інтервального характеру задачі приводить до розв'язку у вигляді певних «точних» чисел, при цьому близькість таких розв'язків до нижніх можливих і, відповідно, до верхніх можливих значень інтервалу не може бути оцінена. В практиці експлуатації енергоблоків АЕС це може спровокувати в ряді випадків прийняття помилкових рішень при розв'язанні задач оптимізації технологічних процесів, при оцінці показників безпеки і надійності.

В такій ситуації цілком очевидними є переваги обробки даних, визначення і побудова моделей методами інтервального аналізу, засоби якого дозволяють врахувати неточності в завданні початкових даних, похибки вимірювань, невизначеності параметрів і структури моделі системи, полірежимний характер функціонування таких складних систем, якими є енергоблоки АЕС. Тому застосування математичного апарату інтервального аналізу, його можливостей і переваг є перспективним для розв'язання широкого спектру задач оцінки безпеки і надійності, підвищення ефективності енергоблоків АЕС на основі коректних експлуатаційних характеристик в умовах невизначеності початкових даних.

Список літератури

1. *Доповідь про стан ядерної та радіаційної безпеки в Україні в 2018 році.* URL: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/doccatalog/document?id=425406> (дата звернення: 15.09.2019).
2. Бузлуков В. А., Теплицкий М. Г., Ойберман Л. Б., Ефимов А. В., Палагин А. А., Меньшикова Е. Д. Получение характеристик оборудования турбоустановок методом натурно-вычислительного эксперимента. *Теплоэнергетика.* 1987. № 8. С. 19–21.
3. Moore R. E., Kearfott R. B., Cloud M. J. *Introduction to interval analysis.* Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009. 223 p.
4. Потанина Т. В., Ефимов А. В., Гаркуша Т. А., Есипенко Т. А. Применение методов интервального анализа для оценки безопасности и надежности энергоблоков АЭС. *Ядерная радиационная безопасность.* 2018. № 3 (79). С. 23–29.
5. Jaulin L., Kieffer M., Didrit O., Walter E. *Applied Interval Analysis.* London: Springer Verlag Limited, 2001. 379 p.
6. Дивак М. П. *Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними.* Тернопіль: Економічна думка ТНЕУ, 2011. 216 с.
7. Gutowski M. W. Interval experimental data fitting. *Focus on Numerical Analysis: a collection of scientific papers.* New York: Nova Science, 2006. P. 27–70.
8. Вошинин А. П. Задачи анализа с неопределенными данными – неопределенность и/или случайность? *Труды междунар. конф. по вычислительной математике. Рабочие совещания. Совещание «Интервальная математика и методы распространения ограничений» ИМРО-2004.* Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2004. С. 147–158. URL: http://www.nsc.ru/interval/Conferences/IMRO_04/Voshchinin.pdf (дата обращения: 15.09.2019).
9. Вошинин А. П. Интервальный анализ данных: развитие и перспективы. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2002. Т. 68, № 1. С. 118–126.
10. Вошинин А. П., Скибицкий Н. В. Калибровка измерительных систем по данным интервальных измерений. *Всероссийское совещание по интервальному анализу и его приложениям ИНТЕРВАЛ-06. Расширенные тезисы докладов. (1–4 июля 2006 г., Петергоф).* Санкт-Петербург: ВВМ, 2006. С. 34–37. URL: <http://www.nsc.ru/interval/Conferences/Interval-06/Proceedings.pdf> (дата обращения: 15.09.2019).
11. Подружко А. А., Подружко А. С., Кирицев П. Н. Интервальные методы решения задач калибровки и классификации. *Труды Института системного анализа РАН.* 2009. № 44. С. 173–186. URL: <http://www.isa.ru/proceedings/images/documents/2009-44/173-186.pdf> (дата обращения: 15.09.2019).
12. Крюков А. В., Литвинцев А. И. Интервальное моделирование режимов электроэнергетических систем в фазных координатах. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2014. № 4 (44). С. 57–62.
13. Родионова О. Е. *Интервальный метод обработки результатов многоканальных экспериментов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.01.* Москва, 2008. 273 с.
14. Grishkevich A. Interwalowe oszacowania wskaznikow niezawodnosci strukturalnej systemow elektroenergetycznych na podstawie metod optymalizacji. *Prace naukowe Akademii im. Jana Dlugosza w Czestochowie. "Technika, Informatyka, Inzynieria Bezpieczenstwa".* 2014. Vol. II. P. 91–106.
15. Shary S. P. Maximum consistency method for data fitting under interval uncertainty. *Journal of Global Optimization.* 2016. Vol. 66, issue 1. P. 111–126.
16. Kreinovich V., Shary S. P. Interval methods for data fitting under interval uncertainty: a probabilistic treatment. *Reliable Computing.* 2016. Vol. 23. P. 105–140.
17. Шарый С. П. Сильная согласованность в задачах восстановления зависимостей по интервальным данным. *Вестник ЮУрГУ. Сер.: Математика. Механика. Физика.* 2017. Т. 9, № 1. С. 39–48. doi: 10.14529/mmp170105
18. Линник Ю. В. *Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений.* Ленинград: Физматгиз, 1962. 352 с.
19. Madsen K., Nielsen N. B., Tingleff O. *Methods for nonlinear least squares problems. Technical Report.* Informatics and Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, 2004. 58 p.
20. Кумков С. И. Интервальный подход к обработке зашумленных экспериментальных данных с многократными измерениями в условиях неопределенности. *Международ. конф. «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика» (30 мая–4 июня 2011 г., Новосибирск).* URL: <http://www.nsc.ru/interval/Conferences/Yanenko90/Kumkov.pdf> (дата обращения: 15.09.2019).
21. *ДСТУ 2858:2015. Термоперетворювачі опору. Зазальні технічні вимоги і методи випробувань /* Нац. стандарт України. Київ: Мінекономрозвитку України, 2017. 22 с.

References (transliterated)

1. *Dopovid' pro stan yadernoyi ta radiatsiynoyi bezpeky v Ukraini v 2018 rotsi* [Report on the State of Nuclear and Radiation Safety in Ukraine in 2018]. Available at: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/doccatalog/document?id=425406> (accessed 15.09.2019).
2. Buzlukov V. A., Teplitskiy M. G., Oyberman L. B., Efimov A. V., Palagin A. A., Men'shikova E. D. Poluchenie kharakteristik oborudovaniya turbostanovok metodom naturno-vychislitel'nogo eksperimenta [Obtaining the characteristics of the turbine units equipment by the full-scale computing experiment method]. *Teploenergetika*. 1987, no. 8, pp. 19–21.
3. Moore R. E., Kearfott R. B., Cloud M. J. *Introduction to interval analysis*. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009. 223 p.
4. Potanina T. V., Efimov A. V., Garkusha T. A., Esipenko T. A. Primenenie metodov interval'nogo analiza dlya otsenki bezopasnosti i nadezhnosti energoblokov AES [Application of interval analysis methods for NPP power units safety and reliability assessment]. *Yaderna ta radiatsiyna bezpeka*. 2018, no. 3 (79), pp. 23–29.
5. Jaulin L., Kieffer M., Didrit O., Walter E. *Applied Interval Analysis*. London, Springer Verlag Limited Publ., 2001. 379 p.
6. Dyvak M. P. *Zadachi matematychnogo modeluvannya statychnykh system z interval'nymy danymy* [Problems of mathematical simulation of static systems with interval data]. Ternopil', Ekonomichna dumka Publ., 2011. 216 p.
7. Gutowski M. W. Interval experimental data fitting. *Focus on Numerical Analysis: a collection of scientific papers*. New York, Nova Science Publ., 2006, pp. 27–70.
8. Voshchinin A. P. Zadachi analiza s neopredelennymi dannymi – neopredelennost' i/ili sluchaynost'? [Analysis problems with uncertain data – intervality and/or randomness?]. *Trudy mezhdunar. konf. po vychislitel'noy matematike. Rabochie soveshchaniya. Soveshchaniye "Interval'naya matematika i i metody rasprostraneniya ogranicheniy" IMRO-2004* [Proc. of the Int. Conf. on Computational Mathematics. Working meetings. Meeting "Interval mathematics and methods of constraint propagation" IMRO-2004]. Novosibirsk, IVMiMG SO RAN Publ., 2004, pp. 147–158. Available at: http://www.nsc.ru/interval/Conferences/IMRO_04/Voshchinin.pdf (accessed 15.09.2019).
9. Voshchinin A. P. Interval'nyy analiz dannykh: razvitiye i perspektivy [Interval data analysis: development and prospects]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2002, vol. 68, no. 1, pp. 118–126.
10. Voshchinin A. P., Skibitskiy N. V. Kalibrovka izmeritel'nykh system po dannym interval'nykh izmereniy [Calibration of measuring systems according to interval measurements]. *Vserossiyskoye soveshchaniye po interval'nomu analizu i yego prilozheniyam INTERVAL-06. Rasshirennyye tezisy dokladov (1–4 iyulya 2006 g., Peterhof)* [All-Russian meeting on interval analysis and its applications INTERVAL-06. Extended abstracts (1–4 July, 2006, Peterhof)]. St. Petersburg, VVM Publ., 2006, pp. 34–37. Available at: <http://www.nsc.ru/interval/Conferences/Interval-06/Proceedings.pdf> (accessed 15.09.2019).
11. Podrzhko A. A., Podrzhko A. S., Kiritsev P. N. Interval'nyye metody resheniya zadach kalibrovki i klassifikatsii [Interval methods for solving calibration and classification problems]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza RAN*. 2009, no. 44, pp. 173–186. Available at: <http://www.isa.ru/proceedings/images/documents/2009-44/173-186.pdf> (accessed 15.09.2019).
12. Kryukov A. V., Litvintsev A. I. Interval'noye modelirovaniye rezhimov elektroenergeticheskikh system v faznykh koordinatakh [Interval simulation of electrical power systems modes in phase coordinates]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*. 2014, no. 4 (44), pp. 57–62.
13. Rodionova O. Ye. *Interval'nyy metod obrabotki rezul'tatov mnogokanal'nykh eksperimentov: dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk 01.04.01* [Interval method for processing the results of multichannel experiments. Dr. phis.-mat. sci. diss.]. Moscow, 2008. 273 p.
14. Grishkevich A. Interwalowe oszacowania wskazanikow niezawodnosci strukturalnej systemow elektroenergetycznych na podstawie metod optymalizacji. *Prace naukowe Akademii im. Jana Dlugosza w Czestochowie. "Technika, Informatyka, Inzynieria Bezpieczenstwa"*. 2014, vol. II, pp. 91–106.
15. Shary S. P. Maximum consistency method for data fitting under interval uncertainty. *Journal of Global Optimization*. 2016, vol. 66, issue 1, pp. 111–126.
16. Kreinovich V., Shary S. P. Interval methods for data fitting under interval uncertainty: a probabilistic treatment. *Reliable Computing*. 2016, vol. 23, pp. 105–140.
17. Shary S. P. Sil'naya soglasovannost' v zadachakh vosstanovleniya zavisimostey po interval'nym dannym [Strong compatibility in data fitting problems with interval data]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika* [Bulletin of the South Ural State University. Ser.: Mathematics. Mechanics. Physics]. 2017, vol. 9, no. 1, pp. 117–127.
18. Linnik Yu. V. *Metod naimen'shykh kvadratov i osnovy teorii obrabotki nablyudeniy* [Least squares method and the basics of observation processing theory]. Leningrad, Fizmatgiz Publ., 1962. 352 p.
19. Madsen K., Nielsen N. B., Tingleff O. *Methods for nonlinear least squares problems. Technical Report*. Informatics and Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, 2004. 58 p.
20. Kumkov S. I. Interval'nyy podkhod k obrabotke zashumlennykh eksperimental'nykh dannykh s mnogokratnymi izmereniyami v usloviyakh neopredelennosti [Interval approach to processing noisy experimental data with multiple measurements under conditions of uncertainty]. *Mezhdunar. konf. "Sovremennyye problemy prikladnoy matematiki i mekhaniki: teoriya, eksperiment i praktika" (30 maya–4 iyunya 2011 g., Novosibirsk)* [Int. Conf. "Contemporary Problems of Applied Mathematics and Mechanics: Theory, Experiment, and Practice" (30 May–4 June 2011, Novosibirsk)]. Available at: <http://www.nsc.ru/interval/Conferences/Yanenko90/Kumkov.pdf> (accessed 15.09.2019).
21. *DSTU 2858:2015. Termoperetvoryuvachi oporu. Zahal'ni tekhnichni vymohy i metody vyprobuvan'* [State Standard 2858:2015. Thermoconverters of resistance. General technical requirements and test methods]. Kyiv, Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine Publ., 2017. 22 p.

Надійшло (received) 24.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Потаніна Тетяна Володимирівна (Potanina Tetiana Vladimirovna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Вища математика»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8216-7901>; e-mail: potaninatetiana@gmail.com

Єфімов Олександр Вячеславович (Efimov Aleksandr Vyacheslavovich, Yefimov Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Парогенераторобудування»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3300-7447>; e-mail: avefimov@kpi.kharkov.ua