

УДК 004.94:681.2:006.354:621.039

doi:10.20998/2413-4295.2025.03.01

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ЯКОСТІ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС ЗАСОБАМИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

**К. Ю. БРОВКО\*, П. Ф. БУДАНОВ, О. В. ВЕЛИКОГОРСЬКИЙ, Н. Д. ВІНОКУРОВА**

*кафедра електротехніки та електроенергетики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: brovkokonstantin@gmail.com*

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто модель цифрового двійника як сучасного інструменту забезпечення кількісної оцінки якості управління в інформаційно-керуючій системі програмно-технічного комплексу автоматизованої системи управління технологічними процесами енергоблоку атомної електростанції. Показано доцільність застосування кластерного підходу до моделювання структури технологічного процесу з виокремленням функціональних підкластерів: керування потужністю, система захисту, регулювання теплоносія та аварійна зупинка. Проаналізовано динамічні і метрологічні характеристики кожного з підкластерів, наведено типові параметри стану, керуючих впливів і зовнішніх збурень з урахуванням їхньої значущості для забезпечення якості та безпеки. Обґрунтовано використання фрактальної розмірності як кількісного індикатора структурної цілісності інформаційно-керуючої системи. Показано, що зміна фрактальної розмірності дозволяє своєчасно виявляти втрату зв'язності між компонентами системи ще до настання функціональних збоїв. Розроблено методику обчислення фрактальної розмірності на основі логарифмічної апроксимації в умовах багаторівневої дискретної структури цифрового двійника. Побудовано архітектуру цифрового двійника, яка включає модулі збору даних, фрактального аналізу, моніторингу, візуалізації, підтримки прийняття рішень та архівації параметрів. Акцентовано увагу на відповідності системи міжнародним стандартам якості, через запровадження механізмів простежуваності, документування змін, оцінки точності та невизначеності вимірювань. Підтверджено ефективність розробленої моделі на експериментальному стенді, що імітує роботу програмно-технічного комплексу автоматизованої системи управління технологічними процесами енергоблоку. Наведено результати тестування цифрового двійника за умов штатної та аварійної роботи. Виявлено, що система здатна фіксувати критичні відхилення фрактальної розмірності в режимі реального часу, автоматично активувати процедури діагностики та забезпечити збереження даних для метрологічного аналізу.

**Ключові слова:** цифровий двійник; фрактальна розмірність; метрологічне забезпечення якості

## PROVIDING QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF MANAGEMENT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF A NPP POWER UNIT USING DIGITAL TWIN

**K. BROVKO\*, P. BUDANOV, O. VELYKOHORSKYI, N. VYNOKUROVA**

*Department of Electrical Engineering and Electrical Power Industry, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkiv, UKRAINE*

**ABSTRACT** The digital twin model is considered as a modern tool for providing quantitative assessment of management quality in the information and control system of the software and hardware complex of the automated process control system of the power unit of a nuclear power plant. The feasibility of using a cluster approach to modeling the structure of the technological process with the allocation of functional subclusters is shown: power control, protection system, coolant regulation and emergency shutdown. The dynamic and metrological characteristics of each of the subclusters are analyzed, typical parameters of the state, control influences and external disturbances are given, taking into account their significance for ensuring quality and safety. The use of fractal dimension as a quantitative indicator of the structural integrity of the information and control system is justified. It is shown that a change in fractal dimension allows for timely detection of loss of connectivity between system components even before the onset of functional failures. A method for calculating fractal dimension based on logarithmic approximation in the conditions of a multi-level discrete structure of a digital twin has been developed. A digital twin architecture has been built, which includes modules for data collection, fractal analysis, monitoring, visualization, decision support, and parameter archiving. Attention is focused on the system's compliance with international quality standards through the introduction of traceability mechanisms, documenting changes, and assessing measurement accuracy and uncertainty. The effectiveness of the developed model has been confirmed on an experimental stand that simulates the operation of the software and hardware complex of the automated process control system of the power unit. The results of testing the digital twin under normal and emergency conditions are presented. It has been found that the system is capable of recording critical deviations in fractal dimension in real time, automatically activating diagnostic procedures, and ensuring data storage for metrological analysis.

**Keywords:** digital twin; fractal dimension; metrological quality assurance

### Вступ

У сучасних умовах підвищених вимог до безпеки та ефективності енергетичних об'єктів

особливого значення набуває питання якості управління технологічними процесами. Експлуатація атомних електростанцій (АЕС) пов'язана з високим рівнем техногенної небезпеки, тому потребує

застосування інноваційних підходів до моніторингу, діагностики та контролю стану технологічного обладнання енергоблоків. Від якості інформаційно-керуючих систем програмно-технічних комплексів (ПТК) автоматизованих систем керування (АСУ ТП), точності вимірювань, своєчасності виявлення відхилень і ефективності реагування залежать безпека персоналу та навколишнього середовища, економічні показники роботи енергоблоків АЕС.

На енергоблоках АЕС критично важливими є точність вимірювань, надійність інформаційно-керуючих систем ПТК АСУ ТП та їх здатність виявляти структурні порушення до моменту виникнення функціональних збоїв в технологічному обладнанні. Ці параметри формують основу системи забезпечення якості й метрологічного контролю, яка має відповідати міжнародним стандартам та національним нормативам. Одним з перспективних інструментів, що поєднує технології інформаційного моделювання з методами системного аналізу, є цифровий двійник – математична модель об'єкта, яка в режимі реального часу, відображає динаміку технологічних процесів та структуру системи управління. Цифровий двійник дозволяє здійснювати безперервний моніторинг, діагностику та контроль технологічних параметрів, виявляти відхилення у роботі систем, моделювати наслідки збоїв та прогнозувати поведінку енергоблоку АЕС в нештатних аварійних ситуаціях.

Дослідження останніх років свідчать про активний розвиток концепції цифрових двійників у ядерній енергетиці, зокрема із застосуванням фрактально-кластерних методів аналізу та моделювання технологічних процесів. Одним із напрямів є використання фрактального підходу для опису нейтронних ланцюгових реакцій та критичних режимів роботи реактора [1,2]. Ці праці заклали фундаментальні засади і показали перспективність фрактального аналізу для моделювання ієрархічних процесів. Водночас залишилися відкритими питання інтеграції цього підходу в інформаційно-керуючі системи ПТК АСУ ТП енергоблоків АЕС для проведення моніторингу, діагностики та контролю стану технологічного обладнання.

Дослідження [3,4] зосереджені на створенні симуляційних моделей цифрових двійників, призначених для онлайн-моніторингу технологічних параметрів енергоблоків АЕС. Розроблені підходи характеризуються високою швидкістю та точністю відтворення динаміки реактора, що підтверджує їх практичну цінність для оперативного контролю. Водночас ці роботи обмежуються переважно імітаційним моделюванням і не приділяють належної уваги кластеризації системи вимірювальних датчиків та інтеграції фрактальних методів аналізу сигналів.

Напрямок досліджень [5-7] орієнтований на розширення функціональності цифрових двійників. У роботі [5] запропоновано інтегральну модель для

діагностики технологічних процесів, що підвищує надійність моніторингу, контролю та діагностики стану енергоблоку АЕС. Роботи [6,7] демонструють застосування цифрових двійників у віртуальних навчальних середовищах для підготовки оперативного персоналу, що створює умови для безпечної підготовки та моделювання аварійних режимів роботи енергоблоку АЕС. Разом із тим, спільним недоліком цих підходів є відсутність засобів перевірки достовірності інформаційних сигналів та обмежений рівень опрацювання питань фрактально-кластерної організації вимірювальної системи.

Важливим блоком досліджень стали праці, спрямовані на діагностику та контроль стану технологічного обладнання енергоблоку АЕС. Зокрема, розроблено фрактально-кластерні методи для виявлення дефектів тепловиділяючих елементів [8], аналізу корозійних відкладень [9] та оцінки передаварійних режимів на основі поведінки інформаційних сигналів [10]. Ці підходи дозволили суттєво підвищити точність контролю та розуміння динаміки аварійних процесів, однак вони здебільшого залишаються відірваними від цифрових технологій і не інтегровані у повноцінні системи цифрових двійників.

Окремо варто виділити роботи, де запропоновано методи оптимізації системи вимірювальних датчиків і алгоритми моніторингу [11,12]. Вони підвищують ефективність використання інформаційних ресурсів і вдосконалюють процес моніторингу, контролю та діагностики, проте не враховують специфіку кластеризації сигналів та фрактальні властивості інформаційного простору.

Таким чином, аналіз літератури показує, що сучасні підходи до побудови цифрових двійників у ядерній енергетиці поєднують фундаментальні фрактальні методи та прикладні симуляційні моделі. Попри значні досягнення, залишаються малодослідженими питання кластеризації сенсорних мереж, інтеграції фрактальних алгоритмів у цифрові технології, а також їх узгодження з міжнародними стандартами. Це визначає перспективні напрями подальших робіт у галузі створення надійних цифрових двійників енергоблоків АЕС.

### Мета роботи

Метою дослідження є розробка моделі цифрового двійника інформаційно-керуючої системи ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС, що поєднує кластерне представлення технологічного процесу та фрактальний аналіз структурної цілісності для оцінювання якості керування технологічним процесом. Це дасть можливість забезпечити простежуваність, структурну діагностику та динамічне управління якістю в умовах складної технічної архітектури енергоблоку АЕС.

Задачі дослідження:

– побудувати кластерну модель технологічного процесу енергоблоку АЕС із виділенням підкластерних модулів, які відображають функціональну структуру ПТК АСУ ТП, та описати відповідні параметри для метрологічного контролю;

– визначити інформативність фрактальної розмірності як індикатора структурної цілісності системи, адаптувати методику її обчислення для багаторівневої інформаційно-керуючої архітектури та обґрунтувати нормативні порогові значення.

– розробити структурно-функціональну архітектуру цифрового двійника, яка інтегрує модулі фрактального аналізу, метрологічного аудиту, SCADA-візуалізації та адаптивного управління якістю відповідно до міжнародних стандартів.

– реалізувати та протестувати прототип цифрового двійника на лабораторному стенді з використанням реального ПЛК-обладнання та сенсорики, провести оцінку ефективності запропонованої моделі в умовах імітації штатних і нештатних режимів функціонування.

#### Виклад основного матеріалу

**Кластерна структура технологічного процесу.** Сучасні інформаційно-керуючі системи ПТК АСУ ТП енергоблоками АЕС вирізняються високим ступенем складності та інтеграції, що ускладнює їх моделювання, контроль і діагностику. Для подолання цих викликів застосовується системно-кластерне представлення, за яким уся система розбивається на підкластерні модулі, що виконують вузькоспеціалізовані функції. Такий підхід дозволяє формувати гнучкі, масштабовані й ефективні моделі, здатні до адаптації у режимі реального часу, що є основою для створення цифрового двійника енергоблоку.

Кожен підкластер моделюється окремо та має власні параметри стану, керуючих впливів і зовнішніх збурень. Таке розділення дає змогу не лише локалізувати аналіз та керування, а й реалізувати метрологічне забезпечення на рівні кожного функціонального блоку. Це відповідає вимогам міжнародних стандартів якості (ISO 9001, ISO/IEC 17025), де чітко визначається важливість простежуваності вимірювань та оцінки достовірності параметрів технологічного процесу. У рамках моделі цифрового двійника енергоблоку АЕС виділено виділити наступні ключові підкластерні модулі:

$C_{1,1}$  – Керування потужністю: відповідає за підтримання номінального рівня потужності ядерного реактора з урахуванням вимог до безпеки, нейтронного балансу та температурного режиму. Вектор стану цього підкластеру включає такі метрологічно значущі параметри, як теплова потужність ядерного реактора, температура активної

зони, щільність нейтронного потоку. Всі ці величини мають бути під постійним метрологічним контролем з точністю до 0,1%. Математична модель керування потужністю представлена формулою (1), табл. 1:

$C_{1,2}$  – Система захисту: забезпечує миттєве реагування на порушення допустимих меж температури, тиску, рівня радіації.

$$\begin{aligned} \frac{dP_r(t)}{dt} &= \alpha_1 \cdot (r_p(t) - P_r(t)) + \beta_1 \cdot \rho(t), \\ \frac{dT_F(t)}{dt} &= \alpha_2 \cdot (P_r(t) - T_F(t)), \\ \rho(t) &= \gamma_1 \cdot \phi_n(t) + \gamma_2 \cdot T_F(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Таблиця 1 – Параметри моделі керування потужністю

| Параметр    | Опис                         | Норм. значення      | Од. вим.               |
|-------------|------------------------------|---------------------|------------------------|
| $P_r(t)$    | Потужність реактора          | 1000–1200           | МВт                    |
| $r_p(t)$    | Задана потужність            | 0–100% номіналу     | МВт                    |
| $T_F(t)$    | Температура палива           | 600–850             | °C                     |
| $\phi_n(t)$ | Щільність нейтронного потоку | $10^{13} - 10^{14}$ | н/см <sup>2</sup> ·с   |
| $\rho(t)$   | Реактивність                 | ±1.0                | дол                    |
| $\alpha_1$  | Інерція потужності           | 0.01–0.1            | с <sup>-1</sup>        |
| $\beta_1$   | Чутливість до реактивності   | 10–50               | МВт/дол                |
| $\alpha_2$  | Інерція температури палива   | 0.01–0.03           | с <sup>-1</sup>        |
| $\gamma_1$  | Вплив нейтронів на $\rho(t)$ | $10^{-14}$          | дол·см <sup>2</sup> /н |
| $\gamma_2$  | Температурний коефіцієнт     | -0.002–0.005        | дол/°C                 |

Булеві змінні вектора стану цього підкластеру свідчать про факт спрацювання логіки захисту, а налаштування порогів спрацювання реалізується відповідно до нормативів державних санітарних правил «Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України» ДСП 6.177-2005-09. Система захисту фіксує перевищення параметрами заданих меж та активує аварійні механізми (формула 2, табл. 2):

$$Z_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } y_j(t) > y_j^{nop} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (2)$$

Таблиця 2 – Параметри системи захисту

| Параметр               | Граничне значення | Од. вим. |
|------------------------|-------------------|----------|
| Температура теплоносія | $T > 330$         | °C       |
| Тиск у першому контурі | $P > 16.5$        | МПа      |
| Радіаційне поле        | $R > 0.25$        | мЗв/год  |

$C_{1.3}$  – Регулювання теплоносія: одна з найважливіших підсистем у забезпеченні теплообміну між ядерним реактором і турбіною. Параметри стану – температура, тиск, витрата в первинному контурі – критично важливі для енергоефективності, й найменші відхилення повинні бути виявлені засобами цифрового двійника. Вектори впливу враховують регулювання теплового навантаження з боку енергосистеми представлені у формулі 3, табл. 3.

$$\frac{dT_n(t)}{dt} = -k_T \cdot (T_n(t) - T_{зовн}) + k_G \cdot G(t),$$

$$\frac{dp(t)}{dt} = -k_P \cdot (p(t) - p_{ном}) + q(t) \quad (3)$$

Таблиця 3 – Параметри моделі регулювання теплоносія

| Параметр   | Опис                         | Норм. значення | Од. вим.                 |
|------------|------------------------------|----------------|--------------------------|
| $T_n(t)$   | Температура теплоносія       | 290–330        | °C                       |
| $T_{зовн}$ | Зовнішня температура         | 25–40          | °C                       |
| $G(t)$     | Витрата теплоносія           | 20,000–35,000  | т/год                    |
| $p(t)$     | Тиск у контурі               | 15.5–16.2      | МПа                      |
| $p_{ном}$  | Номінальний тиск             | 15.8           | МПа                      |
| $q(t)$     | Теплове навантаження         | ±50            | МВт                      |
| $k_T$      | Коеф. теплообміну            | 0.01–0.05      | с <sup>-1</sup>          |
| $k_G$      | Вплив витрати на температуру | 0.001–0.005    | °C на (т/год) за секунду |
| $k_P$      | Інерція стабілізації тиску   | 0.01–0.03      | МПа/с                    |

$C_{1.4}$  – Аварійна зупинка: містить механізми автоматичного припинення ядерної реакції у випадку аварійних (штатних та нештатних) ситуацій. Незважаючи на просту структуру (один булевий стан), цей підкласер має підвищену вимогу до метрологічної надійності сигналів – від нього залежить безпека всього об'єкта. Механізм реакторного глушіння за спрацюванням будь-якого каналу захисту описується формулою (4):

$$S(t) = Z_1(t) \vee Z_2(t) \vee \dots \vee Z_n(t), \quad (4)$$

де  $S(t) \in \{0,1\}$  – стан команди аварійного глушіння, яка активується при спрацюванні будь-якого з захисних каналів. Таким чином, комплексний стан енергоблоку в цифровому двійнику формується на основі зваженого агрегування ключових параметрів технічного стану (5):

$$x(t) = \lambda_1 x_1(t) + \lambda_2 x_2(t) + \lambda_3 x_3(t) + \lambda_4 x_4(t), \quad (5)$$

де  $x_i(t)$  – показники стану підкласеру;  $\lambda_i$  – вагові коефіцієнти для кожного підкласеру, які залежать від режиму роботи системи.

Зміна вагових коефіцієнтів (табл. 4) дозволяє цифровому двійнику адаптувати алгоритми діагностики та прогнозування залежно від поточного режиму функціонування енергоблоку.

Таблиця 4 – Параметри системи захисту

| Режим роботи       | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\lambda_3$ | $\lambda_4$ |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Штатний            | 0,4         | 0,2         | 0,3         | 0,1         |
| Ознаки аварійності | 0,3         | 0,2         | 0,3         | 0,2         |
| Передаварійний     | 0,2         | 0,3         | 0,2         | 0,3         |

Усі параметри  $x_i(t)$  мають бути калібровані згідно з еталонними стандартами, перевірені на достовірність та забезпечені даними про точність, похибку та невизначеність вимірювання.

Цифровий двійник зберігає історію значень параметрів і коефіцієнтів, забезпечуючи повну простежуваність відповідно до ISO/IEC 17025:2017.

**Фрактальна оцінка структурної цілісності інформаційно-керуючої системи ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС як інструмент метрологічного забезпечення якості.** Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС є складною багаторівневою структурою. Вона об'єднує апаратні, програмні, інформаційні та керуючі підсистеми, функціонування яких має бути безперервним, точним та координуваним. З огляду на вимоги до безпеки, енергетичної ефективності та стандартизації, критично важливою є оцінка структурної цілісності інформаційно-керуючої системи ПТК АСУ ТП, яка забезпечує простежуваність та достовірність інформаційно-вимірювальних процесів.

Традиційні методи технічної діагностики базуються переважно на відхиленнях фізичних параметрів (температура, тиск, витрата тощо), однак вони не дозволяють вчасно виявити структурні зміни у зв'язності або конфігурації функціональних блоків, що призводять до збоїв в системі управління.

У цьому контексті актуальним стає фрактальний підхід – сучасний метод, який дозволяє кількісно оцінити структурну складність та

самоподібність конфігурації інформаційно-керуючої системи ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС у динаміці.

Фрактальна розмірність  $d_f$  – це інтегральний показник, що характеризує інформаційно-структурну складність інформаційно-керуючої системи ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС. Він визначає, наскільки глибоко та щільно пов'язані між собою функціональні модулі: сенсори, контролери, виконавчі механізми, SCADA, мережі зв'язку тощо. В розробленій моделі розглядається масштаб  $d_f \in [2,0; 3,0]$ :

– при  $d_f \rightarrow 2,0$  – інформаційно-керуюча система слабо інтегрована, має структуру з мінімальним резервуванням;

– при  $d_f \approx 2,5$  – стандартна ієрархія SCADA–ПЛК–сенсори;

– при  $d_f \rightarrow 3$  – глибоко інтегрована інформаційно-керуюча система з багаторівневою обробкою і відмовостійкістю.

Таким чином, зростання  $d_f$  відображає інформаційну повноту, ступінь самоподібності та об'єм функціональних зв'язків, що важливо для оцінки надійності та управління якістю моніторинга.

Для дискретних структур, таких як у інформаційно-керуючих системах енергоблоків АЕС, розрахунок фрактальної розмірності здійснюється за формулою логарифмічної апроксимації (6) з урахуванням інформаційного об'єму:

$$d_f = 2,0 + \left( \frac{\log N_{\max} - \log N_{\min}}{\log(1/\varepsilon_{\min}) - \log(1/\varepsilon_{\max})} - 1,0 \right), \quad (6)$$

де  $N_{\max}$ ,  $N_{\min}$  – кількість елементів на найнижчому та найвищому рівнях структури інформаційно-керуючої системи;  $\varepsilon_{\max}$ ,  $\varepsilon_{\min}$  – відповідні масштаби деталізації. Розглянемо інформаційно-керуючу систему ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС з чотирма рівнями деталізації (табл. 5).

Для даного випадку фрактальна розмірність у тривимірному (об'ємному) представленні дорівнює:

$$d_f = 2,0 + \left( \frac{\log(27) - \log(1)}{\log(1/(1/8)) - \log(1/1)} - 1,0 \right) = 2,584.$$

Таблиця 5 – Інформаційно-керуюча система з чотирма рівнями деталізації

| Рівень | Приклад компонента          | $N_i$         | Масштаб $\varepsilon_i$  |
|--------|-----------------------------|---------------|--------------------------|
| 1      | SCADA (верхній рівень)      | $N_{\min}=1$  | $\varepsilon_{\max}=1$   |
| 4      | Сенсори, виконавчі елементи | $N_{\max}=27$ | $\varepsilon_{\min}=1/8$ |

Значення  $d_f = 2,584$  свідчить про добре інтегровану SCADA-систему з розгалуженою логікою та стабільною ієрархією. При цьому, якщо значення  $d_f$

падає нижче 2,3 – це індикатор збоїв, а значення вище 2,8 може вказувати на надмірну ускладненість, яка може бути потенційним джерелом інформаційного перенавантаження або зниження ефективності керування.

### Цифровий двійник як системна платформа забезпечення якості управління в інформаційно-керуючій системі енергоблоку АЕС.

Забезпечення якості управління в цифровому двійнику енергоблоку АЕС розглядається не як ізольована функція метрологічного контролю, а як комплексний процес, що інтегрує структурні, метрологічні, інформаційні та аналітичні механізми управління віртуальною моделлю об'єкта. Такий підхід відрізняється від класичних, орієнтованих переважно на результативність і точність вимірювань у реальному середовищі. У цифровому двійнику акцент зміщується на контроль якості вже на рівні конфігурації, логіки керування, взаємодії підкласерів і топології системи ще до виникнення функціональних порушень або фізичних збоїв. Це відкриває принципово нові можливості для впровадження проактивної метрології, де точність, простежуваність, структурна цілісність та адаптивність інтегруються в єдину інформаційно-керуючу систему ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС.

Цифровий двійник відтворює чотири ключові компоненти забезпечення якості. Перший – кількісна оцінка якості, яка базується на аналітичному визначенні структурної складності, зокрема фрактальної розмірності  $d_f$ , а також враховує вагові характеристики функціональних підкласерів і рівень їхнього навантаження. Другий – механізм простежуваності, що реалізується шляхом повного логування змін у конфігурації системи, топологічних зв'язках, вимірювальних каналах, командних сигналах, а також ступеня відхилення технологічних параметрів від заданих значень. Третій – інформаційно-вимірювальне забезпечення, яке охоплює контроль точності віртуальних сенсорів, стабільності каналів, збереження метрологічних сертифікатів і автоматизований аудит калібрувань. Четвертий – компонент оцінки ризиків, який функціонує на основі динамічного аналізу зміни структурної складності  $\Delta d_f(t)$  у часі та виявляє потенційно небезпечні відхилення ще до того, як вони виявляться у фізичних характеристиках об'єкта.

Таким чином, цифровий двійник не лише дублює функціонування енергоблоку, а виконує роль активного елемента системи управління якістю, в якій усі модулі пов'язані між собою і формують адаптивну метрологічну інфраструктуру. Це дозволяє створювати електронні метрологічні карти для кожного підкласеру, автоматизувати процедури аудиту відповідності міжнародним стандартам, а також запроваджувати стандартизовані процедури оцінки метрологічних ризиків при управлінні критичними технологіями. Відповідно, цифровий

двійник забезпечує не лише інформаційну підтримку процесів прийняття рішень, а й виконує роль гарантованого джерела достовірних, простежуваних і структурно обґрунтованих даних.

Для візуалізації моделі інтеграції можна представити структурну схему, яка демонструє взаємозв'язки між основними компонентами цифрового двійника (рис. 1).

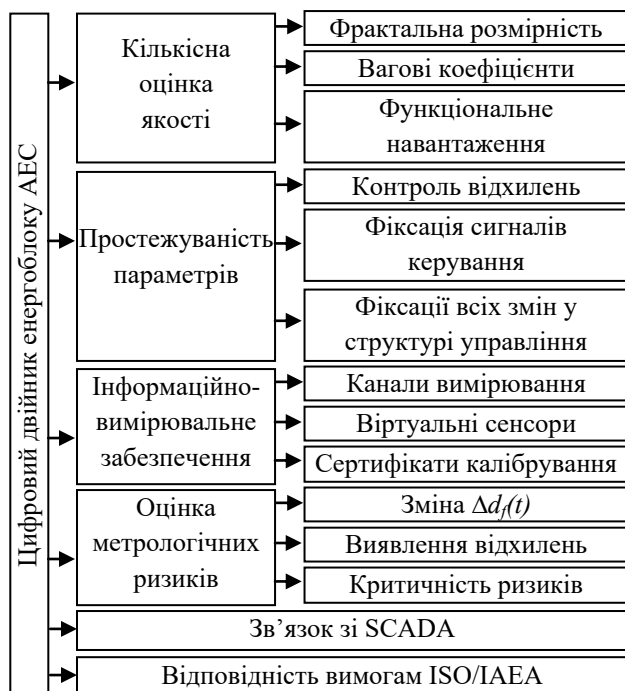


Рис. 1 – Структурна схема інтеграції цифрового двійника з модулями забезпечення якості

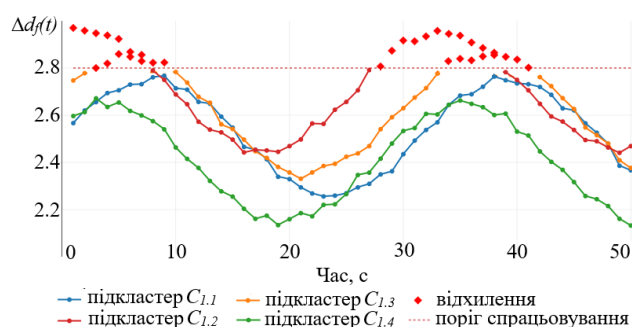


Рис. 2 – Динаміка фрактальної розмірності системи як індикатор функціональних порушень

На графіку (рис. 2) зміни фрактальної розмірності  $\Delta d_f(t)$  у часі показані зони потенційних ризиків – наприклад, періоди, коли рівень структурної складності різко зростає або знижується, що свідчить про нештатні аварійні ситуації.

Таким чином, цифровий двійник енергоблоку АЕС виконує функцію не лише моделі чи симулятора, а інтелектуальної метрологічної платформи, яка забезпечує структурну стабільність, вимірювальну достовірність та повну відповідність міжнародним вимогам якості та безпеки в атомній енергетиці.

**Практична реалізація цифрового двійника в інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС.** Інтеграція цифрового двійника реалізується через побудову багаторівневої програмно-апаратної архітектури, що здатна забезпечити безперервний збір, обробку, аналіз і візуалізацію технічних, метрологічних і структурних параметрів у режимі реального часу (рис. 3).

Структура цифрового двійника моделює не лише процеси, а й логіку інформаційної взаємодії між компонентами – від сенсорного рівня до SCADA-ядра, що дозволяє виявляти відхилення та збої у структурі системи управління до моменту виникнення фізичних порушень. Загальна система включає п'ять взаємопов'язаних модулів:

1. Модуль збору даних – здійснює прийом даних із сенсорів, трансмітерів, програмованих логічних контролерів та інших пристроїв. Забезпечує попередню фільтрацію, синхронізацію, передачу даних у форматах OPC UA, Modbus TCP/IP, Profibus.

2. Модуль фрактального аналізу – виконує динамічну побудову графа функціональних зв'язків, обчислення фрактальної розмірності  $d_f(t)$  для кожного підкластеру, а також зберігає історію змін і виявляє критичні відхилення.

3. SCADA-ядро – координує візуалізацію процесів, операторські панелі, реалізує базову логіку автоматичного керування та зв'язок з вищими рівнями (MES/ERP).

4. Модуль управління якістю – відповідає за формування звітності відповідно до вимог ISO 9001:2015, ISO/IEC 17025, проводить аудит змін, інтегрує систему фрактальних індикаторів у діючі стандарти підприємства.

5. Архів даних – забезпечує довгострокове зберігання телеметрії, подій, логів структурних змін і метрологічних даних для аналізу змін і підтримки прийняття рішень.

Візуалізація роботи цифрового двійника реалізована через адаптивний веб-інтерфейс (HTML5/React.js), що дозволяє оператору здійснювати: моніторинг поточного значення  $d_f(t)$  по кожному підкластеру; перегляд тенденцій зміни фрактальної розмірності за різні часові інтервали; отримання сповіщень про досягнення порогових значень; запуск автоматизованої діагностики з одночасним формуванням технічного звіту.

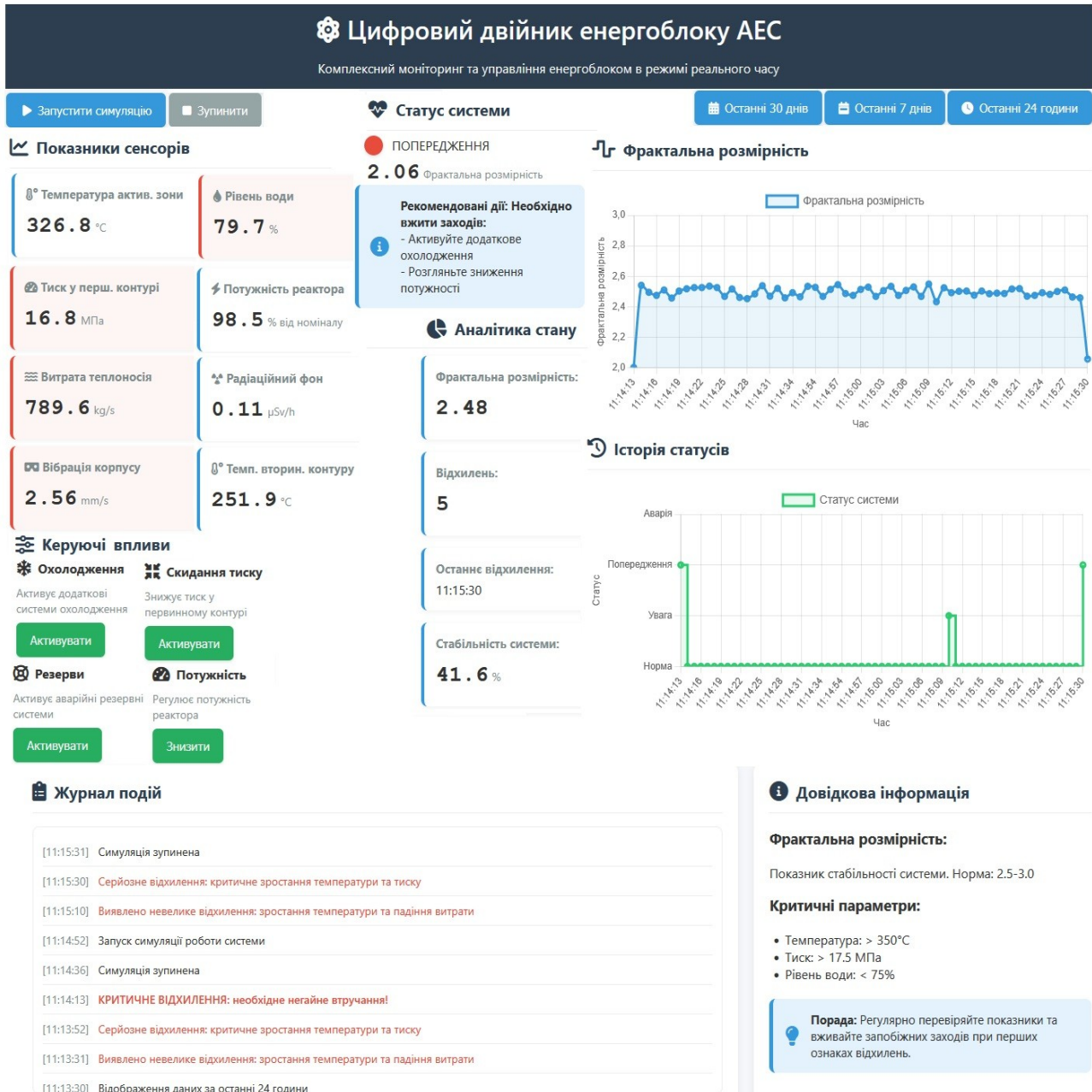


Рис. 3 – Інтерфейс цифрового двійника енергоблоку

У разі фіксації критичного відхилення фрактальної розмірності, наприклад коли значення  $d_f(t)$  наближається до 2,3 або опускається нижче цього порогу, система цифрового двійника автоматично переходить у режим підвищеної готовності. У цей момент розпочинається детермінований ланцюг реакцій, спрямований на діагностику та забезпечення безперервної надійної роботи інформаційно-керуючої системи ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС. Перш за все відбувається фіксація вектора стану кожного підкластеру системи керування – всі значення контрольованих параметрів, сигналів і внутрішніх станів зберігаються для подальшого аналізу. Одночасно формується повний пакет даних для

внутрішнього технічного аудиту, який містить журнали подій, які записують усю активність SCADA-систем. У разі підтвердження аварійної ситуації система автоматично перемикається на резервний режим, якщо такий передбачено архітектурою, або виконує локальну ізоляцію підкластеру, де виявлено порушення. Це дозволяє зберегти функціональність решти системи та мінімізувати ризики подальшого поширення збою. Одночасно система генерує звіт, де фіксуються обставини відхилення, значення параметрів, момент часу, а також структурні зміни в системі керування. Після цього активується режим

ручного втручання: оператор отримує запит на підтвердження або корекцію подальших дій.

Реалізація цифрового двійника була здійснена на навчально-виробничому стенді, створеному для моделювання роботи інформаційно-керуючої системи ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС в лабораторних умовах. До складу стенду увійшли промислові контролери Siemens S7-1500, датчики температури, тиску і витрати виробництва OMEGA та WIKA, Integration Objects OPC UA Server Simulator, а також фрактальний аналізатор. Така конфігурація дозволила протестувати цифровий двійник у різних сценаріях, підтвердивши його ефективність у забезпеченні структурної стабільності, виявленні відхилень і підтримці метрологічної достовірності.

### Обговорення результатів

У межах проведеного дослідження було розглянуто можливості побудови цифрового двійника енергоблоку АЕС як інструменту забезпечення якості, структурного аналізу та метрологічного контролю. Основна увага зосереджувалась на тому, як фрактальна розмірність  $d_f$  може бути використана як узагальнений індикатор структурної цілісності інформаційно-керуючої системи ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС. Цей параметр дозволив не лише відстежувати динаміку функціонального стану інформаційно-керуючої системи, а й формалізувати процеси виявлення відхилень, що пов'язані із порушенням логіки взаємодії між елементами ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС. Застосування фрактального аналізу у цифровому двійнику довело свою ефективність у вирішенні завдань безперервного моніторингу підкласерів, раннього виявлення збоїв у функціональній структурі, а також адаптивного прийняття рішень на основі аналізу відхилень  $\Delta d_f(t)$ .

Важливо, що така модель узгоджується з положеннями міжнародних стандартів, які акцентують на процесності, управлінні ризиками та достовірності вимірювань. Враховуючи переваги запропонованого підходу – інформаційну прозорість, метрологічну простежуваність, можливість прогнозування збоїв та масштабованість моделі – можна говорити про формування нового підходу до управління якістю в складних технічних системах. Особливої цінності набуває те, що цифровий двійник дозволяє зосередити увагу не лише на фізичних параметрах, а на взаємозв'язках і структурі самої системи керування. Таким чином, отримані результати підтверджують доцільність і ефективність застосування цифрового двійника із фрактальним контролем якості в ядерній енергетиці та визначають напрямки подальшого

наукового і прикладного розвитку у сфері стандартизації, метрологічного забезпечення та управління складними об'єктами.

### Висновки

У ході дослідження було обґрунтовано ефективність застосування цифрового двійника як інтегрованої інформаційно-керуючої платформи забезпечення якості управління енергоблоком АЕС. Запропоновано кластерну модель представлення технологічного процесу, що дозволяє структурувати систему ПТК АСУ ТП на функціональні підкласерні модулі з можливістю індивідуального моніторингу, управління та метрологічного супроводу кожного з них. Вперше у контексті АСУ ТП АЕС було застосовано фрактальну розмірність як кількісний індикатор структурної цілісності. Показано, що зміна цього параметра дозволяє виявляти порушення у логіці зв'язків і конфігурації системи ще до виникнення фізичних збоїв. Розроблена методика оцінки фрактальної розмірності для багаторівневої дискретної структури цифрового двійника базується на логарифмічній апроксимації, що є зручною для практичної реалізації в SCADA-архітектурах.

Реалізовано архітектуру цифрового двійника, яка включає модулі збору даних, фрактального аналізу, візуалізації, системи підтримки прийняття рішень та архівування. Продемонстровано, що така структура забезпечує не лише контроль фізичних параметрів, а й структурну діагностику керуючої логіки, що відповідає принципам превентивного управління якістю. Апробація системи на навчально-виробничому стенді підтвердила її здатність виявляти критичні відхилення, забезпечувати автоматизований моніторинг і формувати звіти для аналізу. Результати дослідження засвідчують, що цифровий двійник з фрактальним модулем може бути впроваджений на АЕС як засіб забезпечення простежуваності, адаптивного управління та структурної надійності інформаційно-керуючих систем ПТК АСУ ТП.

Таким чином, наукова новизна роботи полягає у тому, що запропонований підхід базується на фрактально-кластерному представленні структурних підсистем енергоблоку, що забезпечує вищу точність у діагностиці та прогнозуванні стану технологічного обладнання АЕС.

### Список літератури

1. Kaib M. T. H., Kouadri A., Harkat M. F., Bensmail A., Mansouri M. Improving kernel PCA-based algorithm for fault detection in nonlinear industrial process through fractal dimension. *Process Saf. Environ. Prot.*



2023. Vol. 179. P. 525–536. doi: 10.1016/j.psep.2023.09.010.
- Trishch R., Khomiak E., Zabolotnyi O., Cherniak O., Lutai L., Katrich O. Automated Mode of Improvement of the Quality Control System for Nuclear Reactor Fuel Element Shell Tightness. *Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. «Information Technology for Education, Science and Technics»*. 2024. Vol. 1. P. 79–91. doi: 10.1007/978-3-031-71801-4\_7.
  - Hu M., Zhang X., Peng C., Zhang Y., Yang J. Current status of digital twin architecture and application in nuclear energy field. *Ann. Nucl. Energy*. 2024. Vol. 202. P. 110491. doi: 10.1016/j.anucene.2024.110491.
  - Yang J., Langley R. S., Andrade L. Digital twins for design in the presence of uncertainties. *Mech. Syst. Signal Process.* 2022. Vol. 179. P. 109338. doi: 10.1016/j.ymsp.2022.109338.
  - Budanov P., Brovko K., Melnykov V., Yakymchuk M., Kononov V., Kyrsov I., Nosyk A., Karpenko O., Kalnoy S., Khomiak E. Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* 2025. Vol. 4. No. 9 (136). P. 39–49. doi: 10.15587/1729-4061.2025.335712.
  - Pakarinen S., Laarni J., Koskinen H., Passi T., Liinasuo M., Salonen T.-T. Virtual-Reality Training Solutions for Nuclear Power Plant Field Operators: A Scoping Review. *Prog. Nucl. Energy*. 2024. Vol. 169. Article ID: 105104. doi: 10.1016/j.pnucene.2024.105104.
  - Najar M., Wang H. Comparative Study of Deep Learning Models for Accidents Classification in NPP: Emphasizing Transparency and Performance. *Proc. Int. Conf. Nucl. Eng.* 2024. Vol. 88308. P. V010T12A003. doi: 10.1115/ICONE31-133604.
  - Budanov P., Khomiak E., Kyrsov I., Kalnoy S., Karpenko O., Brovko K. Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* 2022. 4(8(118)). P. 60–70. doi: 10.15587/1729-4061.2022.263374.
  - Madhavadas V., Srivastava D., Chadha U., Raj S. A., Sultan M. T. H., Shahar F. S., Shah A. U. M. A review on metal additive manufacturing for intricately shaped aerospace components. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2022. Vol. 39. P. 18–36. doi: 10.1016/j.cirpj.2022.07.005.
  - Budanov P., Kyrsov I., Oliinyk Yu., Brovko K., Zhukov S. Fractal Approach for Researching Information Emergency Features of Technological Parameters. *Int. J. Comput.* 2025. Vol. 24(1). P. 171–177. doi: 10.47839/ijc.24.1.3889.
  - Ma X., Dong Z., Quan W., Dong Y., Tan Y. Real-time Assessment of Asphalt Pavement Moduli and Traffic Loads Using Monitoring Data from Built-in Sensors: Optimal Sensor Placement and Identification Algorithm. *Mech. Syst. Signal Process.* 2023. Vol. 187. Article ID: 109930. doi: 10.1016/j.ymsp.2022.109930.
  - Li Z., Wang H., Fei L., Peng M., Xian Z., Zhou G. Multi-parameter Optimization of NPP Simulation Models Using Enhanced Particle Swarm Method. *Prog. Nucl. Energy*. 2025. Vol. 184. Article ID: 105671. doi: 10.1016/j.pnucene.2025.105671.

## References (transliterated)

- Kaib M. T. H., Kouadri A., Harkat M. F., Bensmail A., Mansouri M. Improving kernel PCA-based algorithm for fault detection in nonlinear industrial process through fractal dimension. *Process Saf. Environ. Prot.*, 2023, Vol. 179, pp. 525–536, doi: 10.1016/j.psep.2023.09.010.
- Trishch R., Khomiak E., Zabolotnyi O., Cherniak O., Lutai L., Katrich O. Automated mode of improvement of the quality control system for nuclear reactor fuel element shell tightness. *Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. "Information Technology for Education, Science and Technics"*, 2024, Vol. 1, pp. 79–91, doi: 10.1007/978-3-031-71801-4\_7.
- Hu M., Zhang X., Peng C., Zhang Y., Yang J. Current status of digital twin architecture and application in nuclear energy field. *Ann. Nucl. Energy*, 2024, Vol. 202, pp. 110491, doi: 10.1016/j.anucene.2024.110491.
- Yang J., Langley R. S., Andrade L. Digital twins for design in the presence of uncertainties. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2022, Vol. 179, pp. 109338, doi: 10.1016/j.ymsp.2022.109338.
- Budanov P., Brovko K., Melnykov V., Yakymchuk M., Kononov V., Kyrsov I., Nosyk A., Karpenko O., Kalnoy S., Khomiak E. Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, 2025, Vol. 4, no. 9(136), pp. 39–49, doi: 10.15587/1729-4061.2025.335712.
- Pakarinen S., Laarni J., Koskinen H., Passi T., Liinasuo M., Salonen T.-T. Virtual-reality training solutions for nuclear power plant field operators: A scoping review. *Prog. Nucl. Energy*, 2024, Vol. 169, pp. 105104, doi: 10.1016/j.pnucene.2024.105104.
- Najar M., Wang H. Comparative study of deep learning models for accidents classification in NPP: Emphasizing transparency and performance. *Proc. Int. Conf. Nucl. Eng.*, 2024, Vol. 88308, pp. V010T12A003, doi: 10.1115/ICONE31-133604.
- Budanov P., Khomiak E., Kyrsov I., Kalnoy S., Karpenko O., Brovko K. Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, 2022, Vol. 4, no. 8(118), pp. 60–70, doi: 10.15587/1729-4061.2022.263374.
- Madhavadas V., Srivastava D., Chadha U., Raj S. A., Sultan M. T. H., Shahar F. S., Shah A. U. M. A review on metal additive manufacturing for intricately shaped aerospace components. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2022, Vol. 39, pp. 18–36, doi: 10.1016/j.cirpj.2022.07.005.
- Budanov P., Kyrsov I., Oliinyk Yu., Brovko K., Zhukov S. Fractal approach for researching information emergency features of technological parameters. *Int. J. Comput.*, 2025, Vol. 24, no. 1, pp. 171–177, doi: 10.47839/ijc.24.1.3889.
- Ma X., Dong Z., Quan W., Dong Y., Tan Y. Real-time assessment of asphalt pavement moduli and traffic loads using monitoring data from built-in sensors: Optimal sensor placement and identification algorithm. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2023, Vol. 187, pp. 109930, doi: 10.1016/j.ymsp.2022.109930.
- Li Z., Wang H., Fei L., Peng M., Xian Z., Zhou G. Multi-parameter optimization of NPP simulation models using enhanced particle swarm method. *Prog. Nucl. Energy*, 2025, Vol. 184, pp. 105671, doi: 10.1016/j.pnucene.2025.105671.

**Відомості про авторів (About authors)**

**Бровко Костянтин Юрійович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9669-9316; e-mail: brovkokonstantin@gmail.com.

**Brovko Kostiantyn** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Power Industry, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9669-9316; e-mail: brovkokonstantin@gmail.com.

**Буданов Павло Феофанович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0000-4519-3879; e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net.

**Budanov Pavlo** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Power Industry, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0000-4519-3879; e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net.

**Великогорський Олег Володимирович** – аспірант кафедри електротехніки та електроенергетики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0005-6102-0659; e-mail: velikogorskijoleg@gmail.com.

**Velykohorskyi Oleh** – postgraduate student of the Department of Electrical Engineering and Electrical Power Industry, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0005-6102-0659; e-mail: velikogorskijoleg@gmail.com.

**Винокурова Наталія Дмитрівна** – асистент кафедри електротехніки та електроенергетики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0008-6210-838X; e-mail: v.natasha.d@gmail.com

**Vynokurova Nataliia** – assistant lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electrical Power Industry, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0008-6210-838X; e-mail: v.natasha.d@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Великогорський О. В., Винокурова Н. Д. Забезпечення кількісної оцінки якості управління технологічним процесом енергоблоку АЕС засобами цифрового двійника. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 3 (25). С. 3-12. doi:10.20998/2413-4295.2025.03.01.

*Please cite this article as:*

Brovko K., Budanov P., Velykohorskyi O., Vynokurova N. Management of the technological process of a NPP power unit using digital twin. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 3(25), pp. 3–12, doi:10.20998/2413-4295.2025.03.01.

*Надійшла (received) 07.08.2025  
Прийнята (accepted) 22.09.2025*