

УДК 621.039.58:004.89:004.94

М.В. САВЕЛЬЄВ^{*,**}, М.П. ПИХТАР^{***}, В.М. МИШКО^{**}

КОНЦЕПТУАЛІЗАЦІЯ ПІДХОДІВ ДО РОЗРОБКИ СТАТИСТИЧНИХ І НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСУ НОВИЙ БЕЗПЕЧНИЙ КОНФАЙНМЕНТ — ОБ'ЄКТ «УКРИТТЯ»

* Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, м. Київ, Україна

** Інститут проблем математичних машин і систем Національної академії наук України, м. Київ, Україна

*** Славутецька філія Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Анотація. У статті запропоновано концептуальні підходи до створення цифрового двійника складного техногенного об'єкта — комплексу Новий безпечний конфайнмент — об'єкт «Укриття» (НБК–ОУ), що є ключовим елементом у системі забезпечення ядерної та радіаційної безпеки на території Чорнобильської зони відчуження. Особлива увага приділяється аналізу джерел вхідних даних, зокрема сенсорним системам збору інформації про температуру, інтенсивність нейтронного потоку, гамма-випромінювання та інші параметри, що фіксуються в межах НБК–ОУ. У статті підкреслюється проблематика неповних чи зашумлених даних, що є типовими для експлуатаційних систем, та пропонуються алгоритмічні рішення для їхньої обробки й реконструкції. У роботі розглянуто переваги й обмеження класичних статистичних методів, як-от регресійний аналіз, ковзні середні, STL-декомпозиція та методи виявлення аномалій. Показано, що ці підходи забезпечують високий рівень інтерпретованості та ефективності на ранніх етапах аналізу, але мають обмеження щодо адаптації до складних нелінійних залежностей. Запропоновано використання нейромережеских моделей, зокрема RNN, LSTM, GRU та CNN, які дозволяють виявляти часові й просторові закономірності у великих масивах даних. Комбінування статистичних і нейромережеских підходів дає змогу побудувати гібридну модель, що краще адаптується до змінних умов експлуатації об'єкта. Архітектурно цифровий двійник моделюється як мікросервісна система, що включає шари збору, обробки, аналітики й візуалізації даних. Запропоновано використання контейнеризації та сервісної мережі для забезпечення масштабованості та ізоляції компонентів. Сформульовано підходи до оцінки ефективності моделі, серед яких узгодженість із історичними даними, стійкість до збурень та прогнозна точність.

Ключові слова: цифровий двійник, НБК–ОУ, нейромережескі моделі, статистичний аналіз, аномалії в часових рядах, LSTM, RNN, CNN, мікросервісна архітектура, прогнозування, ядерна безпека, техногенні системи, сенсорні дані, Чорнобильська АЕС.

Abstract. This article presents conceptual approaches to the development of a digital twin of a complex engineered facility — the New Safe Confinement, the Shelter Object (NSC-SO), which plays a pivotal role in the nuclear and radiation safety framework within the Chornobyl Exclusion Zone. Special attention is paid to the input data sources, which originate from an extensive sensor infrastructure that captures temperature, neutron flux, gamma radiation, and other parameters monitored within the NSC-SO. The article emphasizes the problem of incomplete or noisy data, which are typical of operational systems, and proposes algorithmic solutions for their processing and reconstruction. The research investigates classical statistical approaches, including regression analysis, moving averages, STL decomposition, and anomaly detection techniques. These methods offer high interpretability and are effective for early-stage diagnostics but show limitations in adapting to non-linear patterns and high-dimensional data structures typical of real-world industrial systems. The use of neural network models, in particular RNN, LSTM, GRU, and CNN, is proposed, as they enable the identification of temporal and spatial patterns in large data sets. The combination of statistical and neural network approaches makes it possible to build a hybrid model that better adapts to changing operating conditions of the object. Architecturally, the digital twin is envisioned as a modular, microservice-based system composed of dedicated layers for data collection, preprocessing, analytics, and

visualization. The use of containerization and a service mesh is proposed to ensure scalability and component isolation. The article outlines a framework for evaluating model performance based on historical data fidelity, resilience to disturbances, and error metrics.

Keywords: digital twin, NSC-SO, neural networks, statistical analysis, anomaly detection, LSTM, RNN, CNN, microservice architecture, forecasting, nuclear safety, critical infrastructure, sensor data, Chornobyl NPP.

DOI: 10.34121/1028-9763-2026-1-87-91

1. Вступ

Сучасний розвиток технологій цифрового моделювання та штучного інтелекту відкриває нові можливості для підвищення безпеки та ефективності складних технічних систем. Особливо актуальним є створення цифрових двійників для об'єктів підвищеного рівня ризику, до яких належить комплекс Новий безпечний конфайнмент — об'єкт «Укриття» (НБК–ОУ), призначений для ізоляції радіоактивних матеріалів зруйнованого в 1986 р. позапроектною аварією четвертого енергоблоку Чорнобильської АЕС і перетворення об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему.

Цифровий двійник такого об'єкта дозволяє не лише здійснювати моніторинг і прогнозування його технічного стану в режимі реального часу, а й оптимізувати процеси обслуговування, попереджувати аварійні ситуації та підвищувати загальний рівень радіаційної й ядерної безпеки.

У цьому контексті особливу увагу привертають статистичні та нейромережеві методи моделювання, які здатні ефективно аналізувати великі обсяги даних, виявляти складні залежності та закономірності, а також адаптуватися до змін у поведінці системи. Розробка таких моделей для цифрового двійника НБК–ОУ є важливим кроком на шляху до створення інтегрованих систем управління безпекою та експлуатацією складних техногенних комплексів.

Метою даної статті є обґрунтування та представлення методологічних підходів до розробки і застосування статистичних і нейромережевих моделей у створенні цифрового двійника комплексу НБК–ОУ. Передбачається аналіз можливостей таких моделей щодо підвищення точності прогнозування технічного стану, своєчасного виявлення аномалій і потенційних загроз, а також інтеграція результатів моделювання у систему підтримки управлінських рішень з експлуатації та безпеки складних техногенних об'єктів.

2. Джерела вхідних даних

Одною з ключових вимог до розробки цифрового двійника НБК–ОУ є доступність надійних і репрезентативних даних, що відображають критично важливі параметри фізичної системи. Відповідно до досліджених джерел [1, 2], моніторингова інфраструктура НБК–ОУ містить широку лінійку датчиків, що вимірюють інтенсивність нейтронного потоку і гамма випромінювання, температуру, а також інші фізичні і хімічні параметри, релевантні для внутрішнього середовища НБК–ОУ.

Ці дані отримуються з декількох основних категорій джерел:

- Нейтронні детектори, розміщені в зонах локалізації паливовмісних матеріалів (ПВМ).
- Термопари встановлені в ключових контрольних зонах, а також у структурних елементах.
- Дозиметричне обладнання інтегроване в систему моніторингу радіаційної безпеки.
- Допоміжні датчики, що фіксують додаткові фізико-хімічні параметри, які можуть впливати на ключові процеси або супроводжувати їх.

Значний обсяг цих даних зберігається в цифровому форматі і використовується для оцінки стану навколишнього середовища, виявлення аномалій, а також прогнозування

фізичної і радіологічної динаміки. Важливо зазначити, що реальні дані часто мають відхилення або неприродні тенденції, які виникають через неточності вимірювань, а не через фактичні аномалії в системі. Наприклад, дані можуть бути відсутніми протягом певного періоду, записаними з неоптимальними частотами або піддаватися впливу перекалібрування чи заміни датчиків. Кожен із цих сценаріїв призводить до утворення прогалів чи зміщень у даних, у такий спосіб ускладнюючи аналіз безпосередньо предмета дослідження. До того ж такі обмеження можна вирішити за допомогою відповідних алгоритмів машинного навчання, що дозволить реконструювати неповні набори даних та підвищити ступінь надійності прогнозів, побудованих за допомогою цифрового двійника.

3. Статистичні методи в аналізі даних НБК–ОУ

Для забезпечення надійного моніторингу й оцінки стану НБК–ОУ застосовуються різноманітні статистичні методи, які дозволяють виявляти аномалії у часових рядах, аналізувати тренди та сезонні коливання, а також моделювати залежності між параметрами системи.

3.1. Методи виявлення аномалій у часових рядах

Аномалії у часових рядах, що відображають параметри роботи НБК–ОУ, можуть свідчити про незвичайні події або потенційні несправності. Для їх виявлення широко використовуються методи статистичного контролю, як-от контрольні карти Шухарта, методи на основі порогових значень, а також більш складні підходи, наприклад, виявлення змін (change point detection) та методи на основі кластеризації. Аналіз аномалій дозволяє своєчасно реагувати на відхилення у роботі системи, запобігаючи можливим аваріям.

3.2. Застосування регресійного аналізу, ковзних середніх, STL-декомпозицій

Регресійний аналіз є класичним інструментом для моделювання залежностей між змінними, що дає змогу оцінювати вплив різних факторів на технічний стан комплексу НБК–ОУ. Використання ковзних середніх допомагає згладити короткострокові флуктуації та виділити загальні тренди у часових рядах. STL-декомпозиція (Seasonal-Trend decomposition using Loess) дозволяє розкладати часові ряди на трендову, сезонну та залишкову компоненти, що особливо корисно при аналізі даних із сезонною або циклічною природою, характерною для багатьох інженерних параметрів.

3.3. Переваги і обмеження класичних підходів

Класичні статистичні методи мають переваги у вигляді простоти реалізації, прозорості результатів і достатньої інтерпретованості, що робить їх незамінними на початкових етапах аналізу даних НБК–ОУ. Однак вони часто мають обмежену здатність адаптуватися до нелінійних залежностей, високої розмірності даних та складної структури шумів, що характерні для реальних техногенних систем. Тому для підвищення точності прогнозування і виявлення складних патернів доцільно комбінувати класичні статистичні методи з сучасними підходами штучного інтелекту, зокрема нейромережевими моделями.

4. Нейромережеві моделі

Нейромережеві підходи все частіше використовуються в галузі аналізу часових рядів, особливо для завдань, пов'язаних із прогнозуванням динамічних технологічних параметрів. У контексті комплексу НБК–ОУ особлива увага приділяється архітектурам, призначеним для обробки послідовних даних, зокрема рекурентним нейронним мережам (RNN), включаючи моделі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM), та моделям із рекурентним блоком (GRU).

Згідно з опублікованими дослідженнями [3], зміни температури та нейтронної активності в НБК–ОУ можуть свідчити як про короткострокові коливання, так і про довгострокові тенденції, на які впливають зовнішні фактори або внутрішні процеси. У таких випадках моделі на основі RNN демонструють явні переваги над традиційними статистичними методами, зокрема в їхній здатності фіксувати часові залежності та нелінійну динаміку в різних часових горизонтах.

Крім того, має місце інтеграція глибокого навчання з просторовим аналізом. Зокрема, згорткові нейронні мережі (CNN) і їхня здатність виявляти просторові закономірності в розподілі температурних полів або потужності дози гамма-випромінювання в різних областях внутрішньої конструкції захисної оболонки. Ці моделі можуть виявляти приховані структурні особливості з сенсорних сіток та підтримувати розробку просторово-орієнтованих прогностичних систем.

Спільне використання архітектур RNN та CNN дозволяє створювати гібридні моделі, здатні одночасно обробляти часові та просторові виміри даних, тим самим підвищуючи точність моделювання та прогнозів, що генеруються в рамках системи цифрових двійників. Такі можливості особливо важливі в таких середовищах, як НБК, де рішення щодо безпеки залежать від своєчасної та точної інтерпретації багатовимірних даних датчиків.

5. Архітектура цифрового двійника

Як інженерна та програмна конструкції, цифровий двійник повинен дотримуватися принципів модульності, масштабованості та адаптивності. Згідно з основою, запропонованою в [4], розробка цифрового двійника повинна базуватися на архітектурі мікросервісів, де функціональні компоненти розділені на окремі шари, кожен з яких відповідає за певну частину конвеєра обробки даних та прийняття рішень.

1. Шар збору даних — взаємодіє з сенсорними пристроями та джерелами даних.
2. Шар попередньої обробки — виконує такі операції, як-от фільтрація, очищення та нормалізація даних.
3. Шар аналітики — проводить статистичний аналіз та аналіз на основі нейронних мереж, включаючи розпізнавання образів, виявлення аномалій та прогнозування.
4. Шар візуалізації та взаємодії з користувачем — представляє результати зацікавленим сторонам через панелі інструментів та інструменти підтримки прийняття рішень.

Для підтримки модульного розгортання та операційної гнучкості технології контейнеризації, як-от Docker, можуть використовуватися в поєднанні з сервісною мережею, яка координує взаємодію та зв'язок між мікросервісами. Ця архітектура може не тільки полегшити управління складними робочими процесами, але й підвищити стійкість системи, ізоляцію несправностей та масштабованість — все це важливі характеристики для критично важливої системи цифрового двійника НБК–ОУ.

6. Оцінка результатів

У контексті застосування цифрового двійника для підтримки моніторингу та прийняття рішень НБК–ОУ ключовим фактором є оцінка того, наскільки добре прогнози, згенеровані моделлю, узгоджуються з фактичною поведінкою системи. Хоча повномасштабне практичне впровадження цифрового двійника наразі знаходиться на стадії планування, існуючі методологічні підходи вже дозволяють розробити структуру, яка інтегрує прогностичні результати з емпіричними даними для цілей валідації.

Можна запропонувати кілька критеріїв оцінки для оцінки продуктивності та надійності моделі:

1. Узгодженість з історичними даними — здатність моделей відтворювати тенденції та закономірності, що спостерігаються в ретроспективних наборах даних.

2. Стабільність до зовнішніх збурень — стійкість прогнозів при змінах умов навколишнього середовища або мінливості вхідних даних датчиків.

3. Порівняння за допомогою метрик помилок — оцінка різних моделей на основі загальних показників точності прогнозування (без зазначення абсолютних числових порогів).

Важливо наголосити, що на поточному етапі основною метою є не створення високоточних числових прогнозів. Швидше, основна увага приділяється створенню функціональної логіки та архітектурної основи для цифрового двійника, яку можна адаптувати, калібрувати та перевірити під час реальної експлуатації. Ця фундаментальна робота прокладає шлях для поступового розгортання системи, інтеграції в інфраструктуру моніторингу та подальшого вдосконалення за допомогою ітеративного зворотного зв'язку та донавчання моделі.

7. Висновки

Розробка цифрового двійника для комплексу НБК–ОУ є перспективним напрямом щодо підвищення ефективності систем моніторингу та прогнозування. Показано, що інтеграція як класичних статистичних методів, так і моделей нейронних мереж є виправданим та життєздатним підходом, що дозволяє побудувати гібридну систему, здатну працювати в режимі реального часу.

Така система використовує сильні сторони кожного методу — інтерпретованість та стабільність статистичних методів у поєднанні з гнучкістю та прогностичною здатністю глибокого навчання — для забезпечення надійної аналітичної основи для динамічних та невизначених середовищ, як-от НБК–ОУ.

Майбутні дослідження повинні бути спрямовані на такі ключові напрями:

1. Удосконалення адаптивних алгоритмів для забезпечення реагування на нові та змінювані потоки даних.

2. Поглиблена валідація моделей із використанням історичних даних для оцінки продуктивності в реальних умовах та покращення узагальнюваності.

3. Практичне впровадження прототипу цифрового двійника в операційне середовище НБК–ОУ для оцінки продуктивності в режимі реального часу та керівництва подальшим розвитком системи.

Ці зусилля сприятимуть поступовому переходу від концептуального проєктування до оперативного розгортання, зрештою підтримуючи безпечне та більш обґрунтоване прийняття рішень в управлінні ядерною інфраструктурою високого ризику.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Skiter I.S., Saveliev M.V. Modelювання аномалій щільності потоку нейтронів в автоматизованій системі контролю ядерної безпеки об'єкта «Укриття». *Математичні машини і системи*. 2021. № 4. С. 70–77. DOI: <https://doi.org/10.34121/1028-9763-2021-4-70-77>.

2. Mykhailov O.V., Saveliev M.V., Godun R.L., Avgustov V.V. Long-term temperature dynamics at the peripherals on Nuclearly Hazardous Clusters of Fuel-Containing Materials located in room 305/2 of «Shelter» Object before and after NSC installation into design position. *Nucl. Phys. At. Energy*. 2022. Vol. 23, Issue 4. P. 245–254. DOI: <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.04.245>.

3. Saveliev M.V., Godun R.L., Pantin M.A., Skiter I.S., Sushchenko K.O. The nuclear safety monitoring system for fuel-containing materials located in destroyed unit N 4 of the Chornobyl NPP and proposals for its modernization. *Nucl. Phys. At. Energy*. 2022. Vol. 23, Issue 3. P. 172–181. DOI: <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.03.172>.

4. Kratz B., Wieduwilt F., Saveliev M. Pillars for Establishing a Durable and Future-Proof IT Architecture Maturing Along with the NSC: Approaches from Continuous Integration to Service Mesh. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2021*. Lecture Notes in Networks and Systems / Shkarlet S. et al. (eds.). 2022. Vol. 344. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89902-8_4.

Стаття надійшла до редакції 13.11.2025 / прийнята до друку 12.02.2026