

## АНОТАЦІЯ

*Лобода П.П.* Методи та програмні засоби обробки даних цифрового двійника конфайнменту Чорнобильської атомної електростанції. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена розробці науково-методичних підходів до створення цифрового двійника Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС.

Аварія на четвертому реакторі Чорнобильської атомної електростанції (ЧАЕС) в квітні 1986 році стала однією з найбільших техногенних аварій в історії людства. З метою захисту населення та оточуючого середовища над зруйнованим четвертим енергоблоком ЧАЕС було збудовано спеціальну споруду, що отримала назву Об'єкт «Укриття». Однак плановий термін експлуатації Об'єкту «Укриття» (ОУ) становив лише 30 років, тому з допомогою світового співтовариства було побудовано нову захисну споруду «Новий безпечний конфайнмент» (НБК).

НБК є унікальною великою складною системою підвищеної небезпеки з плановим терміном експлуатації 100 років. Основною метою функціонування НБК є захист населення й довкілля від шкідливого радіоактивного забруднення та забезпечення виконання робіт з перетворення ОУ на екологічно безпечний об'єкт. В результаті впливу різноманітних факторів (метеорологічні, радіаційні, роботи по демонтажу нестабільних конструкцій ОУ та інші) в НБК виникають процеси, що збільшують кількість та складність експлуатаційних задач і вимагають оперативного прийняття рішень персоналом на основі аналізу поточних та накопичених історичних даних. Однією з таких задач є управління вентиляційними установками НБК під впливом певного вітрового навантаження.

Питанням моделювання, автоматизації управління процесами НБК, розвитку його інформаційних систем присвячені роботи таких українських та закордонних вчених як П.Г. Круковський, Є.В. Дядюшко, Д.І. Скляренко, В. О. Краснов, А. В. Носовський, В. М. Рудько, В. М. Щербіна, В.Г. Батій, А.О. Сізов, Д. В. Федорченко, А.О. Холодюк, Є.М. Письменний, Роберт Уоррен, Джозеф Карсон, Клаус Шлайдер, Жан-Жак Габріель Bernd Kratz, Florian Wieduwilt та інші.

Визнаючи наукову і практичну цінність наявних робіт, слід зазначити, що існуючі моделі дозволяють прогнозувати та оцінювати різні характеристики НБК, однак вони не утворюють єдиної інтегрованої системи моделювання. Інформаційні системи НБК реалізують управління його процесами, однак деякі процеси (наприклад, управління вентиляцією) потребують автоматизації та забезпечення підтримки прийняття рішень. Крім того, наявні інформаційні системи мають недостатні можливості для 3D візуалізації інформації та прогнозування.

Таким чином, виникає протиріччя між збільшенням кількості та складності задач обробки даних при експлуатації НБК в умовах обмежених можливостей його інформаційних систем та потребою в зменшенні часу на прийняття обґрунтованих рішень персоналом при вирішенні цих задач. Враховуючи сучасний стан методів та засобів програмної інженерії, в якості базової концепції вирішення цього протиріччя та відповідного розвитку інформаційних технологій НБК в осяжному майбутньому була обрана технологія цифрових двійників.

Проблематиці розробки та застосування цифрових двійників присвячені роботи Сулеми Є. С., Дички І.А., Grieves M., Traar G., Karner M., Kritzinger W., Henjes J., Sihn W., M.Grieves, J.Vickers, A.Saddik, H. Zhang, Madni Azat M., Madni S., Гаврилка Є.В., Савельєва М.В. та багатьох інших. Цифрові двійники застосовуються для інтелектуалізації управління експлуатацією об'єктів, навчання персоналу, візуалізація інформації, прогнозування, підтримки прийняття рішень, запобігання надзвичайних ситуацій та їх подоланню. Існує

достатньо велика кількість програмних продуктів для побудови цифрових двійників. Однак на сьогодні відсутні узагальнені комплексні наукові дослідження в галузі інженерії програмного забезпечення, що формують цілісне бачення проблематики створення цифрових двійників надвеликих, радіаційно і ядерно небезпечних об'єктів, яким є єдиний у світі НБК ЧАЕС, тому актуальним є вирішення наукового завдання з розробки архітектури, методу і програмного забезпечення обробки даних цифрового двійника НБК ЧАЕС.

Метою дисертаційної роботи є покращання можливостей обробки даних для аналізу і управління станом НБК шляхом розробки пов'язаних за єдиними концептуальними підходами архітектури, методів, моделей та програмних засобів його цифрового двійника. Для досягнення поставленої мети виконано часткові завдання: аналіз призначення, функціональних можливостей, архітектури та основних характеристик існуючих інформаційних систем управління та обробки даних НБК; дослідження сучасних підходів до обробки даних при моделюванні та управлінні процесами НБК; огляд концепції цифрових двійників та особливостей обробки даних в них; формування вимог до цифрового двійника НБК та розробка його архітектури; розробка моделі обробки даних у базах даних та знань цифрового двійника НБК; розробка архітектури програмного забезпечення 3D візуалізації інформації стану цифрового двійника НБК; розробка методу і програмного забезпечення цифрового двійника для керування вентиляцією НБК та його перевірка.

Наукова новизна результатів дослідження полягає в наступному.

Вперше розроблено багаторівневу архітектуру цифрового двійника НБК, яка враховує особливості об'єкту автоматизації, взаємодію з наявними інформаційними системами, моделі та алгоритми управління та прийняття рішень, що дозволило визначити підходи до розробки програмного забезпечення цифрового двійника.

Отримала подальший розвиток модель бази даних НБК ЧАЕС, що на відміну від відомих побудована за рахунок інтеграції в структурах даних його цифрового двійника інформації з різних підсистем з врахуванням просторових координат, часової динаміки та змін обладнання, що поліпшило можливості обробки історичних даних, візуалізації та прогнозування стану НБК ЧАЕС.

Вперше розроблена архітектура програмного забезпечення 3D візуалізації інформації стану цифрового двійника НБК, що побудована на основі технології мікросервісів з використанням цифрових геометричних моделей НБК та ОУ, яка дозволила реалізувати 3D візуалізацію даних та покращило можливості аналізу стану НБК.

Вперше розроблено метод керування вентиляцією НБК на основі його цифрового двійника, новизна якого полягає в використанні нейро-нечітких моделей для розрахунку витрат вентиляційних установок, що враховують статистиків в основному і кільцевому просторі НБК, що дозволило покращити процес прийняття рішень персоналом.

Перевірка на контрольній вибірці показала, що похибка розрахунків по розроблених нейро-нечітких моделях не перевищує 2.5% та 3.2%, що свідчить про їх адекватність та можливість практичного застосування.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що їх використання підвищило рівень автоматизації проектувальних робіт, розширило можливості обробки даних та підтримки прийняття рішень в задачах управління вентиляційними системами та дозволило поліпшити навчальний процес з підготовки виробничого персоналу НБК ЧАЕС. Застосування запропонованого методу нейро-нечіткого управління вентиляційними системами дозволяє скоротити неорганізовані викиди повітря з радіоактивними аерозолями із Нового безпечного конфайнмента ЧАЕС в оточуюче середовище в середньому на 17,2%. Результати дослідження прийнято до впровадження в Державному спеціалізованому підприємстві «Чорнобильська АЕС» (№ 6700-149 від

29.06.2023); в Інституті технічної теплофізики НАН України (акт реалізації від 08.09.2023 р.); в навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (акт реалізації від 13.09.2023 р.) при викладанні дисципліни «Проектування інформаційних систем з нечіткою логікою».

Вирішене в дисертаційному дослідженні наукове завдання має істотне значення для теоретичних основ створення та удосконалення програмного і алгоритмічного забезпечення для аналізу, прогнозування та управління процесами НБК.

Отримані наукові результати досліджень є вагомим внеском у розвиток теоретичних і прикладних основ програмної інженерії стосовно розробки цифрових двійників, моделювання та автоматизації управління, 3D візуалізації даних процесів НБК, що є складовою вирішення задачі забезпечення захисту населення та довкілля від наслідків аварії на ЧАЕС.

В якості можливих подальших напрямків продовження дослідження можна відмітити наповнення бібліотеки моделей та бібліотеки алгоритмів цифрового двійника НБК шляхом систематизації існуючих моделей і алгоритмів та розробки нових, створення цифрової геометричної моделі устаткування НБК, постановки та вирішення задач розробки підсистем підтримки прийняття рішень в межах запропонованої в роботі архітектури цифрового двійника.

**Ключові слова:** цифровий двійник, програмне забезпечення, модель даних, новий безпечний конфайнмент, архітектура системи, інформаційна система, інформаційна технологія, нейро-нечітка мережа, нечітка логіка, база даних, моделювання, підтримка прийняття рішень, автоматизована система, обробка даних, 3D візуалізація.

## ANOTATION

**Loboda P.P.** Methods and software tools for data processing of the digital twin of the confinement of the Chernobyl nuclear power plant. – Qualifying scientific work, the manuscript.

PhD thesis in the field of knowledge 12 Information technologies in a specialty 121 Software engineering. – National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute”, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to the development of scientific and methodological approaches to the creation of a digital twin of the New Safe Confinement of the Chernobyl Nuclear Power Plant.

The accident at the fourth reactor of the Chernobyl nuclear power plant (ChNPP) in April 1986 became one of the largest man-made accidents in the history of mankind. In order to protect the population and the surrounding environment, a special structure was built over the destroyed fourth power unit of the Chernobyl Nuclear Power Plant, which was named the "Shelter Object". However, the planned operational life of the "Shelter Object" (SO) was only 30 years, so with the help of the international community, a new protective structure "New Safe Confinement" (NSC) was built.

NSC is a unique large complex system of increased danger with a planned service life of 100 years. The main purpose of the operation of the NSC is to protect the population and the environment from harmful radioactive pollution and to ensure the implementation of works to transform the SO into an environmentally safe facility. As a result of the influence of various factors (meteorological, radiation, work on dismantling unstable structures of the SO, and others), processes arise in the NSC that increase the number and complexity of operational tasks and require prompt decision-making by personnel based on the analysis of current and accumulated historical data. One of these tasks is the management of NSC ventilation units under the influence of a certain wind load.

The works of such Ukrainian and foreign scientists are devoted to issues of modeling, automation of NBK process management, development of its information systems as P.G. Krukovskyi, E.V. Dyadyushko, D.I. Sklyarenko, V.O. Krasnov, A.V. Nosovskyi, V.M. Rudko, V.M. Shcherbina, V.G. Batii, A.O. Sizov, D.V. Fedorchenko, A.O. Kholodyuk, E.M. Pysmennyi, Robert Warren, Joseph Carson, Klaus Schleider, Jean-Jacques Gabriel Bernd Kratz, Florian Wieduwilt and others.

Recognizing the scientific and practical value of the existing works, it should be noted that the existing models allow forecasting and evaluation of various characteristics of the NSC, but they do not form a single integrated modeling system. Information systems of the NSC implement the management of its processes, however, some processes (for example, ventilation management) require automation and support for decision-making. In addition, existing information systems have insufficient capabilities for 3D visualization of information and forecasting.

Thus, there is a contradiction between the increase in the number and complexity of data processing tasks during the operation of the NSC in conditions of limited capabilities of its information systems and the need to reduce the time for making informed decisions by personnel when solving these tasks. Taking into account the current state of methods and means of software engineering, the technology of digital twins was chosen as the basic concept of solving this contradiction and the corresponding development of information technologies of the NSC in the foreseeable future.

The works of E. S. Sulema, I. A. Dychka, M. Grieves, G. Traar, M. Karner, M. Kritzinger, J. Henjes, J. Sihn, M. Grieves, J. Vickers, A. Saddik, H. Zhang, Madni Azat M., Madni C., Havrilka E.V., Savelieva M.V. and many others are devoted to the problems of development and application of digital twins. Digital twins are used for the intellectualization of facility operation management, personnel training, information visualization, forecasting, decision-making support, prevention of emergency situations and their overcoming. There is a fairly large number of software products for building

digital twins. However, to date, there are no generalized comprehensive scientific studies in the field of software engineering that form a holistic vision of the issue of creating digital twins of super-large, radiation- and nuclear-dangerous objects, which is the only one in the world, the NSC of the ChNPP, therefore the solution of the scientific task of developing the architecture, method and software for data processing of the digital twin of the NSC of the ChNPP is urgent.

The aim of the dissertation work is to improve data processing capabilities for analysis and management of the state of the NSC by developing architecture, methods, models and software tools of its digital twin connected by unified conceptual approaches. To achieve the goal, partial tasks were completed: analysis of the purpose, functional capabilities, architecture and main characteristics of the existing information systems of management and data processing of the NSC; research of modern approaches to data processing in modeling and management of NSC processes; overview of the concept of digital twins and features of data processing in them; formation of requirements for the digital twin of the NSC and development of its architecture; development of a data processing model in databases and knowledge of the digital twin of the NSC; development of software architecture for 3D visualization of information about the state of the digital twin of the NSC; development of the method and software of a digital twin for controlling the ventilation of the NSC and its verification.

The scientific novelty of the research results is as follows.

For the first time, a multi-level architecture of the NSC digital twin was developed, which takes into account the features of the automation object, interaction with existing information systems, management and decision-making models and algorithms, which made it possible to determine approaches to the development of digital twin's software.

The model of the database of the NSC of the ChNPP received further development, which, unlike the known ones, was built due to the integration in the data



structures of its digital twin of information from various subsystems, taking into account spatial coordinates, temporal dynamics and changes in equipment, which improved the possibilities of processing historical data, visualization and state forecasting of the NSC of the ChNPP.

For the first time, the software architecture for 3D visualization of information on the state of a digital twin of the NSC was developed, built on the basis of microservices technology using digital geometric models of the NSC and SO, which enabled the implementation of 3D data visualization and improved the capabilities of NSC condition analysis.

For the first time, a method of controlling the ventilation of the NSC was developed based on its digital twin, the novelty of which is the use of neuro-fuzzy models to calculate the costs of ventilation units, taking into account the state of pressures in the main and ring space of the NSC, which made it possible to improve the decision-making process of personnel.

The check on the control sample showed that the calculation error of the developed neuro-fuzzy models does not exceed 2.5% and 3.2%, which indicates their adequacy and the possibility of practical application.

The practical significance of the obtained results is that their use increased the level of automation of design work, expanded the possibilities of data processing and decision-making support in the tasks of managing ventilation systems, and made it possible to improve the training process for the training of production personnel of the ChNPP. The application of the proposed method of neuro-fuzzy control of ventilation systems allows to reduce unorganized emissions of air with radioactive aerosols from the NSC of the ChNPP into the environment by an average of 17.2%.

The results of the study were accepted for implementation at the State Specialized Enterprise "Chernobyl NPP" (No. 6700-149 dated 06/29/2023); at the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine (deed of implementation dated September 8, 2023); in the educational process of the

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (implementation act dated 13.09.2023) when teaching the discipline "Designing information systems with fuzzy logic".

The scientific task solved in the dissertation study is of significant importance for the theoretical foundations of the creation and improvement of software and algorithmic support for analysis, forecasting and management of the NSC processes.

The obtained scientific research results are a significant contribution to the development of the theoretical and applied foundations of software engineering in relation to the development of digital twins, modeling and automation of control, 3D visualization of NSC process data, which is a component of solving the problem of ensuring the protection of the population and the environment from the consequences of the accident at the Chernobyl NPP.

As possible further directions for the continuation of the research, it is possible to note the filling of the library of models and the library of algorithms of the digital twin of the NSC by systematizing existing models and algorithms and developing new ones, creating a digital geometric model of the equipment of the NSC, setting and solving the problems of developing decision-making support subsystems within the framework of the digital twin architecture proposed in the work.

**Keywords:** digital twin, software, data model, new safe confinement, system architecture, information system, information technology, neural fuzzy network, fuzzy logic, database, modeling, decision support, automated system, data processing, 3D visualization.