

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ЛОБОДА ПЕТРО ПЕТРОВИЧ**

УДК 004.94:504.06

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ОБРОБКИ ДАНИХ ЦИФРОВОГО  
ДВІЙНИКА КОНФАЙНМЕНТУ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АТОМНОЇ  
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**

121 – Інженерія програмного забезпечення

12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ П.П. Лобода

Науковий керівник:  
КОВАЛЬ Олександр Васильович,  
доктор технічних наук, доцент

КИЇВ – 2023

## 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. Складенко, 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 стан тисків 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.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Loboda P.P., Starovit I.S. Architecture of the digital twin for the New safe confinement of the CHNPP. *Зв'язок*. 2022. №2. С. 22-26.
2. Лобода П.П., Старовіт І.С. Моделювання та управління процесами Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС на основі технології цифрових двійників. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Технічні науки*. 2023. №2(85). С. 168-173.
3. Лобода П.П., Старовіт І.С. Модель бази даних та знань цифрового двійника Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Computer Science and Applied Mathematic*. 2022. №2. С. 50-57.
4. Лобода П.П., Старовіт І.С. Розробка архітектури програмного забезпечення прогнозування і управління термогазодинамічними процесами і радіаційним станом Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Технічні науки*. 2022. №4(83). С. 67-73.
5. Loboda P.P. 3D visualization of the state of the new secure confinement of CHNPP using microservice architecture. *Зв'язок*. 2023. №3. С. 29-33.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

6. Loboda P.P., Koval O.B. Construction of the digital twin architecture for the New Safe Confinement of the CHNPP. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. У 2-х т. : Матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ. (присвячена 125-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського та 90-річчю НН ІАТЕ (ТЕФ)), м. Київ, 25–28 квіт.2023 р. / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка» Київ, 2023. Т. 2. С. 114 – 115.*
7. Petro Loboda, Ivan Starovit. Data formalization of the digital twin for the New

Safe Confinement of the CHNPP. *Новітні технологічні тенденції інтелектуальної індустрії та Інтернету речей.* : Матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. «ТТСИТ-2023», м. Київ, 24–25 січня 2023 р. / КНУБА Київ, 2023. С. 15 – 19.

8. Коваль О.В., Гаврилко Є.В., Лобода П.П., Старовіт І.С. Структура бази даних та знань цифрового двійника Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Інформаційні технології та інженерія* : Матеріали всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів, м. Миколаїв, 7–10 лютого 2023 р. / ЧНУ імені Петра Могили. Миколаїв, 2023. С. 100 – 101.

9. Лобода П.П. Програмне забезпечення цифрового двійника для підготовки персоналу Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Резильєнтність критичної інфраструктури – 2023* : Матеріали наук.-практ. конф., м. Київ, 21 червня 2023 р. / ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України Київ, 2023. С. 100 – 101.

10. Лобода П.П., Старовіт І.С., Коваль О.В., Гаврилко Є.В., Шушура О.М. Технологія цифрових двійників в задачах управління процесами Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Technologies and strategies for the implementation of scientific achievements* : collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the II International Scientific and Theoretical Conference, November 18, 2022. Stockholm, Kingdom of Sweden: European Scientific Platform, 2022. PP. 103 – 105.

11. Старовіт І.С., Лобода П.П., Гаврилко Є.В. Оптимізація роботи вентиляційних установок НБК ЧАЕС при змінних граничних умовах. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. У 2-х т.* : Матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ. (присвячена 125-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського та 90-річчю НН ІАТЕ (ТЕФ)), м. Київ, 25–28 квіт.2023 р. / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка» Київ, 2023. Т. 2. С. 111 – 112.

12. Старовіт І.С., Лобода П.П., Гаврилко Є.В., Шушура О.М. Нейро-нечітке управління вентиляцією нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *X Всеукр. наук.-практ. конф. здобув. вищої освіти та молод. вчених з автоматичного*

управління : тези доп., 12 квіт.2023, Херсон – Хмельницький / редкол.: Рудакова Г.В. та ін. Херсон – Хмельницький, 2023. С. 57 – 59.

13. Лобода П.П. 3D візуалізація стану нового безпечного конфайнменту ЧАЕС на основі мікросервісної архітектури. *Achievements of 21st Century Scientific Community* : Матеріали I міжнародної наук.-практ. конф., м. Дніпро, 14-15 вересня 2023 р. / Мареніченко В.В. Дніпро, 2023. С. 282 – 284.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ .....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ДАНИХ НБК .....	25
1.1 Загальна характеристика НБК .....	25
1.2 Дослідження існуючих підходів до моделювання та управління процесами НБК .....	28
1.3 Огляд концепції та особливостей побудови цифрових двійників.....	33
1.4 Постановка наукового завдання дослідження.....	49
Висновки до розділу 1 .....	50
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ДАННИХ НБК .....	52
2.1 Дослідження архітектури та функціональних можливостей обробки даних інтегрованої системи управління НБК .....	52
2.2 Моделювання та автоматизація управління вентиляційними системами НБК .....	59
2.2.1 Характеристика задачі управління вентиляцією НБК.....	59
2.2.2 Нейро-нечітке моделювання витрат повітря вентиляційних установок кільцевого простору НБК .....	63
2.2.3 Нейро-нечітке моделювання витрат повітря вентиляційних установок основного об'єму НБК.....	69
2.2.4 Розробка методу нейро-нечіткого управління вентиляційними системами НБК .....	76
Висновки до розділу 2 .....	78

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ТА МОДЕЛЕЙ СТРУКТУР ДАНИХ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА НБК.....	80
3.1 Формування вимог до цифрового двійника .....	80
3.2 Розробка архітектури цифрового двійника .....	90
3.3 Розробка моделі бази даних та знань цифрового двійника.....	97
3.3.1 Формалізація характеристик інформаційних об'єктів цифрового двійника .....	97
3.3.2 Концептуальне моделювання та розробка структур даних та знань цифрового двійника.....	103
Висновки до розділу 3 .....	118
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ 3D ВІЗУАЛІЗАЦІЇ СТАНУ НБК .....	120
4.1 Формування вимог до 3D візуалізації стану НБК .....	120
4.2 Архітектура програмного забезпечення 3D візуалізації стану НБК .....	123
4.3 Модель та засоби реалізації бази даних програмного забезпечення 3D візуалізації стану НБК.....	134
4.4 Результати 3D моделювання стану НБК.....	140
Висновки до розділу 4 .....	144
ВИСНОВКИ.....	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	149
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА .....	165
ДОДАТОК Б АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ .....	169
ДОДАТОК В ЛІСТИНГИ КОДУ ПРОГРАМНИХ РЕАЛІЗАЦІЙ .....	173



**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ**

ЧАЕС	- Чорнобильська атомна електрична станція
ОУ	- спеціальна захисна споруда «Об’єкт Укриття»
НБК	- Новий безпечний конфайнмент
РАВ	- радіоактивні відходи
ІСУ	- Інтегрована система управління
ІАСК	- Інтегрована автоматизована система контролю
AI	- штучний інтелект
СУБД	- система управління базами даних
API	- Application Programming Interface
CFD	- Computational Fluid Dynamics
IoT	- Internet of Things
ОПР	- особа, що приймає рішення

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** 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» (ОУ). 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. Складенко, 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 дозволяють реалізувати 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 можна обрати технологію 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 C., 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.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження відповідає вимогам статті 5 Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11 липня 2001 року № 2623-III (зі змінами та доповненнями від 12.01.2023 р.), пункту першого розділу другого «Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2023 року», затвердженого Постановою КМУ від 7 вересня 2011 р. № 942.

Дисертаційна робота виконана відповідно з поточними та перспективними планами наукової та науково-технічної діяльності Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» для подальшого розвитку інженерії програмного забезпечення.

Результати дисертаційної роботи є складовою науково-дослідної роботи: “Програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень забезпечення техногенно-екологічної безпеки” (РК № 0121U109761).

**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 необхідно виконати наступні 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.

Слід зазначити, що дане дослідження має певні обмеження, а саме те, що розробка програмного забезпечення та перевірка його на працездатність можлива лише на основі відкритих і доступних історичних даних НБК.

**Об’єкт дослідження:** процес обробки даних НБК ЧАЕС

**Предмет дослідження:** методи, моделі та програмні засоби обробки даних цифрового двійника НБК ЧАЕС

**Методи дослідження.** Для досягнення сформованої в роботі мети використано методи системного та порівняльного аналізу (для визначення актуальності та постановки наукового завдання дослідження); теорії множин для формалізації основних інформаційних об’єктів та зв’язків між ними; теорії нечітких множин, нечіткої логіки, нечіткої кластеризації та нейро-нечіткого моделювання під час автоматизації управління вентиляційними системами НБК; структурний аналіз та синтез для аналізу наявних інформаційних систем НБК та побудови архітектури цифрового двійника; методи моделювання баз даних та знань для розробки структур зберігання інформації в цифровому двійнику НБК.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. 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.

2. 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.
3. 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.
4. 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 стан тисків в основному і кільцевому просторі НБК, що дозволило покращити процес прийняття рішень персоналом.

**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».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження отримані автором особисто. В дисертаційній роботі використані лише ті з результатів, що опубліковані у наукових роботах у співавторстві, які становлять індивідуальний внесок автора.

В роботах, які написані в співавторстві, автору належить: [1] – розробка узагальненої архітектури цифрового двійника НБК; [2] – нейро-нечітке моделювання витрат вентиляційних установок НБК; [3] – розробка моделей баз даних цифрового двійника НБК; [4] – постановка задачі розробки цифрового двійника НБК та архітектура його програмного забезпечення для прогнозування і управління термогазодинамічними процесами і радіаційним станом НБК.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень, викладені у дисертаційній роботі, доповідались та обговорювались на міжнародних та всеукраїнських конференціях та семінарах: XX Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (25-28 квітня, 2023, м. Київ); II Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технологічні тенденції інтелектуальної індустрії та Інтернету речей» (24–25 січня, 2023, м. Київ); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології та інженерія» (7–10 лютого 2023, м. Миколаїв); Науково-практичній конференції «Резильєнтність критичної інфраструктури – 2023» (21 червня 2023, м. Київ); II Міжнародній науково-практичній конференції «Technologies and strategies for the implementation of scientific achievements» (November 18, 2022. Stockholm, Kingdom of Sweden); X Всеукраїнській науково-

практичній конференції здобувачів вищої освіти та молод. вчених з автоматичного управління (12 квіт.2023, Херсон – Хмельницький); І Міжнародній науково-практичній конференції «Achievements of 21st Century Scientific Community» (14-15 вересня 2023, м. Дніпро).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 13 наукових праць. У тому числі 5 наукових статтях у періодичних виданнях України, включених до “Переліку наукових фахових видань України” [1-5], в 8 тезах доповідей та матеріалах науково-практичних конференцій [6-13].

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків та має 131 сторінку основного тексту. Список використаних джерел містить 134 найменування на 16 сторінках. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 199 сторінок.



## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ДАНИХ НБК

Як відомо, НБК є захисною спорудою, яка включає в собі комплекс технологічного обладнання для вилучення зі зруйнованого четвертого енергоблоку ЧАЕС матеріалів, що містять ядерне паливо, поводження з радіоактивними відходами та інші системи, призначені для здійснення діяльності з перетворення цього енергоблоку на екологічно безпечну систему та забезпечення безпеки персоналу, населення та довкілля [4]. Функціонування НБК забезпечує значна кількість різноманітних засобів та підсистем. Розробка та удосконалення програмного забезпечення для обробки даних НБК на основі застосування технології цифрових двійників вимагає аналізу його характеристик, дослідження сучасних підходів до моделювання та управління процесами НБК, огляду концепції та особливостей побудови цифрових двійників.

#### 1.1 Загальна характеристика НБК

Для подолання наслідків аварії на ЧАЕС, недопущення виходу радіоактивних аерозолів та інших видів радіаційного забруднення в навколишнє середовище в 1986-1987 роках над четвертим реактором ЧАЕС було побудовано спеціальну захисну споруду «Об'єкт Укриття» (ОУ). Плановий термін експлуатації ОУ становив 30 років. Об'єкт «Укриття» значною мірою обмежив негативний вплив на довкілля, локалізуючи радіоактивні матеріали, які в ньому містились. Як зазначено у академіка А.Носовського [14], ОУ успішно виконав свою функцію, однак в наступний період система захисту довкілля потребувала свого розвитку. В подальшому зусилля з перетворення ОУ на екологічно

безпечну систему провадилися відповідно до вимог Законів України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації ЧАЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» [15], «Про Загальнодержавну програму зняття з експлуатації ЧАЕС та перетворення об'єкта “Укриття” на екологічно безпечну систему» [16] та «Стратегії перетворення об'єкта “Укриття”» [17, 18]. Документи [15, 16] та інші формують поле законодавчого забезпечення, що в цілому дозволяє зробити припущення про важливість досліджень в цій галузі знань принаймні найближчі п'ятдесят років.

Це стало умовою до рішень міжнародної спільноти про утворення глобальної ініціативи щодо побудови нової захисної споруди, яка отримала назву Новий безпечний конфайнмент. НБК був введений в експлуатацію в 2019 році. Основним елементом захисної споруди є Арка, яка має висоту приблизно 109 м., ширину 257 м. та довжину 150 м. Схематично загальний вид НБК та ОУ в поперечному розрізі представлено на рисунку 1.1.

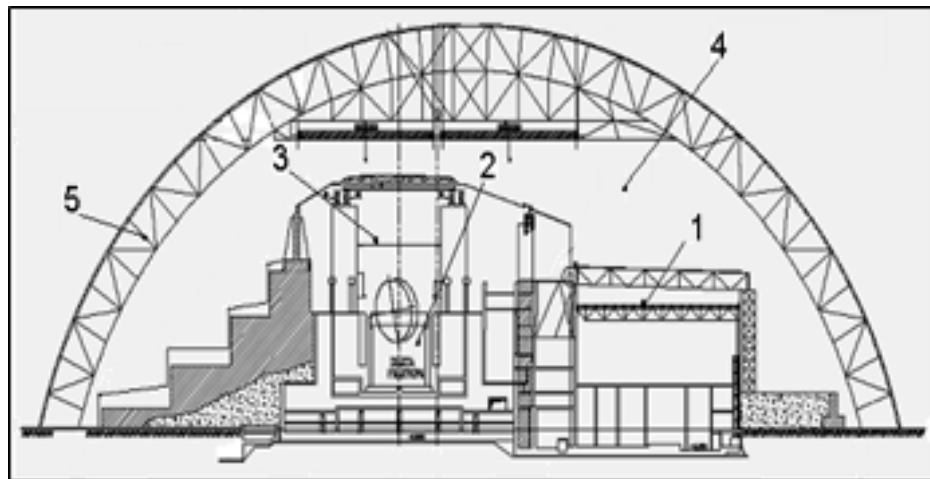


Рис. 1.1. Схема НБК та ОУ у поперечному перерізі: 1- турбінна зала, 2 – зруйнований реактор, 3 – центральна зала, 4 – основний об'єм та 5 – кільцевий простір НБК [17]

Як можна побачити на рисунку 1.1, на верхній пояс ферм Арки спираються прогони, до яких кріпиться система зовнішньої обшивки, а до внутрішньої частини сталевих конструкцій Арки прикріплені прогони внутрішньої обрешітки, до яких прикріплені конструкції системи внутрішньої обшивки. Внутрішній простір між зовнішньою та внутрішньою обшивкою є закритим й отримав назву «кільцевий» простір, який разом із системою вентиляції кільцевого простору служить для захисту конструкцій Арки від зовнішніх кліматичних впливів. Плановий термін використання обох обшивок складає 100 років за умови підтримання певних показників вологості в кільцевому та основному просторі НБК [19].

Отже, НБК як багатофункціональний об'єкт призначений для:

- забезпечення нерозповсюдження радіоактивних відходів (РАВ) поза його межами;
- технологічного забезпечення розміщення і функціонування систем та елементів, необхідних для його нормальної експлуатації;
- фізичного захисту ядерних та радіоактивних матеріалів;
- забезпечення системи гарантій і вимог Міжнародного агентства з атомної енергетики (МАГАТЕ).

Експлуатація НБК передбачає використання численних систем, їх підсистем та елементів, врахування зв'язків між ними, як наявних, так і тих, що будуть спроектовані та впроваджені в майбутньому [18-22]. Велика кількість різноманітних факторів, що впливають на об'єкт, нестаціонарність його процесів збільшує кількість задач для прийняття рішень персоналом. Зазначені дослідження ґрунтовно дослідили екологічні, технологічні аспекти перетворення ОУ в екологічно безпечну систему. Вони містять результати, які слід врахувати під час вирішення наукової задачі цього дослідження шляхом застосування при розробці архітектури цифрового двійника НБК.

Слід зазначити, що ОУ та НБК утворюють єдину систему, яку можна назвати складною та великою. Для розробки методів, моделей та програмних засобів обробки даних цифрового двійника НБК (тут й надалі будемо розуміти під НБК єдину систему ОУ та НБК ЧАЕС) необхідно розглянути існуючі підходи до моделювання та автоматизації управління його процесами.

## **1.2 Дослідження існуючих підходів до моделювання та управління процесами НБК**

Для моніторингу та управління процесами НБК було розроблено та введено в експлуатацію спеціалізовану Інтегровану систему управління (ІСУ). Система створена із залученням сучасних, високопродуктивних, цифрових програмно-технічних засобів. Вона має дворівневу, розподілену та відкриту архітектуру для керування підсистеми НБК. Протягом усього терміну служби НБК ІСУ має виконувати управління основним технологічним обладнанням, здійснювати моніторинг експлуатаційних параметрів і основних характеристик НБК. В роботах [23, 24] відмічена особливість ІСУ НБК як злиття апаратного та програмного забезпечення в єдину систему, використання єдиної бази даних. Для цього забезпечено єдине введення даних та їх багаторазове та багатоцільове використання, всі операції виконуються за допомогою єдиного інтерфейсу та загальних інструментів.

Слід відзначити, що ІСУ запроектована з урахуванням злиття з Інтегрованою автоматизованою системою контролю (ІАСК) ОУ [19, 23, 24].

Авторським колективом в [19, 25] детально описуються підсистеми управління та контролю ІАСК, яка забезпечує збирання, обробку, зберігання, відображення, аналіз та архівування отриманої інформації, видачу звітних даних та сигналів про досягнення/перевищення встановлених меж експлуатації,

контрольованих параметрів, а також передачу оброблених даних у систему верхнього рівня ІСУ НБК, контроль та/або управління технологічними системами. Згадані підсистеми автоматично сенсорами у визначених точках об'єкта вимірюють параметри радіаційного фону та інші характеристики НБК, передають та зберігають цю інформацію у таблицях контролю параметрів системи. Оскільки такі систем контролюють важливі робочі характеристики НБК слід більш детально дослідити різні аспекти використання розроблених підсистем ІАСК НБК та ОУ, яка є системою постійного моніторингу НБК [19].

Під час проведення оцінки характеристик НБК було проаналізовано основні і допоміжні системи і елементи систем, що забезпечують контроль стану самого НБК, стану елементів ОУ, що перебуває під куполом конфайнменту. Встановлено, що основними й можна сказати системоутворюючими є системи, що контролюють термогазодинамічний, вологісний та радіаційний стан ОУ та НБК [26-28].

Тобто моніторинг НБК разом з ОУ представляє собою комплекс заходів спостереження за їх станом для визначення та передбачення моменту переходу в граничний стан, що є загрозливим як для НБК так і для навколишнього середовища. Принциповою відмінністю моніторингу стану від моніторингу параметрів є наявність інтерпретатора параметрів, що вимірюються, або експертної системи підтримки прийняття рішень щодо характеристики стану об'єкта та подальше управління ним. Аналіз наявної експлуатаційної документації показав, що сьогодні функціонує система моніторингу параметрів лише на ОУ, це системи "Сигнал" та "Фініш-Р" [28].

Таким чином, ІСУ НБК та ІАСК ОУ здійснюють моніторинг стану НБК та управління його процесами, тому в подальших розділах даної роботи необхідно більш детально розглянути їх особливості для врахування під час розробки методів обробки даних та архітектури цифрового двійника НБК.

Слід зазначити, що в наявних системах управління НБК рівень візуалізації інформації недостатньо високий, відсутні можливості 3D візуалізації. Ведуться роботи щодо створення систем 3D візуалізації для моделювання процесу демонтажу конструкцій ОУ, однак комплексне розв'язання цієї задачі можливе на основі технології цифрових двійників [29].

Необхідність покращання візуалізації інформації щодо стану НБК, забезпечення підтримки прийняття рішень та автоматизації управління його процесами обумовлює актуальність удосконалення існуючих та розробки нових інформаційних технологій. Враховуючи тривалий термін експлуатації НБК, запропоновано підходи до розвитку його ІТ-архітектури з врахуванням таких концепцій як «Безперервний розвиток», «Безперервна інтеграція» та «Безперервне розгортання» [30].

Основу подальшого розвитку інформаційних систем НБК закладають розроблені моделі його процесів та методи обробки даних.

Спорудження НБК поставило завдання комп'ютерного моделювання при експлуатації та перетворенні ОУ [31], оцінки впливу встановлення арочної конструкції у проектне положення на радіаційні умови на ОУ [32], аналізу можливих шляхів поведінки з паливними матеріалами після завершення будівництва НБК [33].

Особливу увагу було приділено моделюванню процесів демонтажу нестабільних конструкцій ОУ на радіаційний стан НБК та персонал, що буде виконувати зазначені роботи. Було проведено комп'ютерне моделювання процесів та зон виконання робіт на ОУ [34], здійснювалося моделювання дозових навантажень на персонал при пересуванні в неоднорідних радіаційних полях [35], в тому числі об'ємний розподіл полів гамма-випромінювання у зоні Центральної зали 4-го енергоблоку ЧАЕС [36].

Для моделювання радіаційного стану НБК було розроблено CFD (Computational Fluid Dynamics) модель як його цифровий двійник, що поставило

питання застосування технології цифрових двійників до моделювання процесів НБК [37].

Недоліком представлених вище робіт є те, що вони здебільшого створені як вузькоспрямовані моделі (як наводився приклад вище, тільки для моделювання об'ємного розподілу гамма-випромінювання), як правило не враховують спільну 3D геометрію конструкцій ОУ та НБК, розподіл концентрації радіоактивних аерозолів в основному об'ємі НБК та їх осідання, та ін. Нажаль, вони не розглядають весь комплекс проблематики інформатизації управління ОУ та НБК, сильних і слабих сторін систем управління, можливості інформаційних технологій.

Оскільки одним з основних завдань побудови НБК є запобігання витоку радіоактивного забруднення до навколишнього середовища, питання моделювання руху повітряних потоків разом з радіоактивними аерозолями розглядалося різними дослідниками досить активно. Відомо, що конструкції ОУ мають велику кількість щілин, через які буде проникати повітря та РАВ в основний об'єм НБК. Однак повну герметичність такої величезної споруди як НБК забезпечити неможливо, через що в оболонках кільцевого простору НБК, між стінами та будівельними конструкціями й під ними наявні чисельні витоки повітря із НБК в навколишнє середовище. Виконувалося моделювання та дослідження термогазодинамічного та радіаційного стану НБК та ОУ, їх неорганізований повітрообмін з оточуючим середовищем [38,39].

Запропоновано модель з використанням CFD моделей та штучних нейронних мереж для оцінки обсягів неорганізованих витрат повітря з радіоактивними аерозолями за межі НБК в оточуюче середовище при довільних швидкостях і напрямках вітру [40], створено модель оцінки тисків всередині НБК та підходи до управління гідравлічними потоками з метою скорочення неконтрольованих викидів повітря з радіоактивними аерозолями за умови відключення вхідних вентиляційних установок, що забезпечують мінімізацію

витрат електроенергії [41], розглянуто питання аналізу та прогнозування перенесення радіоактивного пилу при експлуатації НБК [42, 43], розроблено концепцію системи прогнозування та раннього виявлення місць та концентрацій радіоактивних аерозолів в НБК [30], представлено методику оцінки концентрації радіоактивних аерозолів під час проведення робіт, пов'язаних з вилученням паливовміщуючих матеріалів з ОУ [44].

Крім того, через перепади температур усередині ОУ та НБК, які залежать від пори року, часу доби та режиму роботи персоналу в ОУ при розбиранні нестабільних будівельних конструкцій, різних тепловиділень усередині НБК та ОУ виникають нестационарні термогазодинамічні процеси теплової конвекції та руху повітря [45–47], що мають ураховуватися при моделюванні розповсюдження радіоактивних аерозолів.

В [47] доведено, що розрахунки теплогазодинамічного, вологостного та радіаційного станів НБК та їх прогнозування можна ефективно виконати за допомогою сучасних методів комп'ютерного моделювання на основі CFD моделей, які адекватно описують необхідні фізичні процеси, що відбуваються в ОУ та НБК у різних умовах. Використання таких моделей дозволяє на основі вимірювання параметрів об'єкта в окремих точках (так званий моніторинг параметрів) отримувати детальні розподіли значень цих параметрів по всьому об'єкту (моніторинг стану), а також вміти передбачити досягнення критичних значень параметрів та визначити необхідні рішення для запобігання виникненню позаштатних ситуацій. Такі детальні моделі, вбудовані в ІАСК для реалізації постійно діючого моніторингу та прогнозування стану НБК, можна використовувати як базові складові елементи його цифрового двійника.

Слід зазначити, що основним способом запобігання неконтрольованого витоку радіоактивних аерозолів з НБК до навколишнього середовища є підтримка операторами, що керують системою вентиляції, певного балансу тисків в основному об'ємі та кільцевому просторі споруди. Це робить актуальним



задачу моделювання та автоматизації управління роботою вентиляційних установок НБК. Оскільки розробка CFD моделей є досить складним та довгим процесом, і враховуючи вдалий досвід застосування штучних нейронних мереж для моделювання протічок [40], в даній роботі необхідно розглянути для вирішення цієї задачі також використання штучних нейронних мереж або нейро-нечіткого моделювання.

Таким чином, існує необхідність доповнення функцій ІСУ НБК можливостями 3D візуалізації даних та моделювання основних процесів для підвищення ефективності управління НБК. Одним з можливих варіантів забезпечення комплексного моделювання та управління процесами НБК є застосування технології цифрових двійників [10], тому необхідно провести дослідження їх концепції та особливості побудови.

### **1.3 Огляд концепції та особливостей побудови цифрових двійників**

Бурхливий розвиток протягом останніх років технологій та засобів штучного інтелекту (AI), підходів до обробки великих масивів даних та їх кодування, Інтернету речей та відповідних сенсорних технологій призвів до появи та розвитку технології так званих цифрових двійників (Digital Twin, DT або dt). Цифровим двійником називають віртуальний прототип реального фізичного об'єкта, виробу, групи виробів або процесу, суть якого полягає у збиранні та повторному використанні цифрової інформації [48]. Слід відзначити, що саме «повторне використання цифрової інформації», її інтелектуальна обробка є головним елементом розвитку та навчання цифрового двійника з метою ефективно перетворитися в цифрову модель свого «господаря». Така технологія має вже зараз певний розвиток, однак наразі в рамках розвитку економіки України ще отримала широкого розповсюдження.

Автор у [49] наводить наступне визначення терміну «Цифровий двійник», який являє собою цифрову копію живої або неживої фізичної сутності. Завдяки з'єднанню фізичного та віртуального світу дані передаються без проблем, дозволяючи віртуальній сутності існувати одночасно з фізичною сутністю.

В Україні розвиток теорії цифрових двійників відбувається за різними напрямками. Одним з центрів, де створюється така теорія є Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Професором цього університету Євгенією Сулемою розвинута теорія створення цифрових двійників. Автор зазначає, що як сутність цифровий двійник являє собою індивідуалізовану реалістичну віртуальну модель певного об'єкта – свого фізичного двійника, що досліджується. Одночасне існування моделей (візуальної та поведінкової) об'єкта, що досліджується, реалізовано з допомогою відповідних математичних моделей і моделей подання даних, що втілюють синхронізацію між віртуальною і реальною системою на рівні даних, які надходять із сенсорів, передбачених для постійного моніторингу значень властивостей об'єкту та їх змін. Отримавши такі дані, цифровий двійник можна використовувати для моделювання, вивчення проблем продуктивності та генерування можливих покращень, отримання цінної інформації, якою потім можна скористатися при впровадженні змін фізичного об'єкта [50].

Тут слід зауважити, що цифровий двійник як такий має значні відмінності відносно звичного моделювання. Хоча і моделювання, і цифрові двійники використовують цифрові моделі для імітації різних операцій системи, цифровий двійник – це вже віртуальний світ, що робить його більш доступним для подальшого дослідження. Основна відмінність між симуляцією та цифровим двійником полягає в масштабі: у той час як симуляція зазвичай аналізує один процес, цифровий двійник може проводити стільки відповідних симуляцій, скільки необхідно для аналізу кількох процесів.

Також дані у реальному часі зазвичай не підходять для моделювання. Однак цифрові двійники призначені для роботи з двостороннім інформаційним потоком, який починається, коли датчики об'єкта надають системному процесору відповідні дані, і продовжується, коли процесор обмінюється новими знаннями з об'єктом-оригіналом.

Слід зазначити, що цифрові двійники можуть вивчати більше проблем зі значно більшої кількості точок зору, ніж стандартне моделювання, тому що вони мають більш якісні та постійно оновлювані дані, що відносяться до широкого кола галузей, які поєднанні з додатковою обчислювальною потужністю, що надає віртуальне середовище.

Згідно існуючих технологій, що дійшли в своєму розвитку до рівня практичної реалізації, цифровий двійник є складною програмною системою, яка містить сховище даних та набір програмних модулів. Такі складові забезпечують отримання, обробку та візуалізацію даних.

Зараз в привідних країнах світу створені і використовуються спеціалізовані програмні засоби для розробки цифрових двійників різних об'єктів, які використовуються у промисловому виробництві, системній інженерії, робототехніці, мережах транспорту, охороні здоров'я, медицині та інших [51,52]. До таких програмних засобів станом на початок 2023 року фахівцями в цій галузі справедливо віднесено програмне забезпечення для моделювання цифрового виробництва aPriori; DigitalClone for Engineering; Digital Twin Organization от Interfacing, AWS IoT (Internet of Things); Siemens NX; LIA. Це список не є завершеним і може мати своє продовження в майбутньому [52].

Інформаційні технології цифрових двійників, які вже реалізовані, включають (але не обмежуються) методи моделювання (наприклад, моделювання дискретних подій, безперервне моделювання тощо), протоколи

зв'язку та інші технології, які зазвичай називають основними технологіями Індустрії 4.0. (Інтернет речей, хмарні обчислення, великі дані тощо) [53].

Проте, нажаль, усі вони не забезпечують технічних вимог щодо створення і наступного використання цифрового двійника НБК, оскільки на сьогодні певні технічні рішення і особливості конструкції НБК, як унікального об'єкту, не знайшли відображення в депозитаріях моделей згаданого вище програмного забезпечення, що ще раз підкреслює актуальність мети даної дисертаційної роботи.

До класифікації типів цифрових двійників існують різні підходи.

За функціональністю виокремлюють наступні типи цифрових двійників: цифровий двійник-прототип (digital twin prototype) та цифровий двійник-екземпляр (digital twin instance). Для фізичного об'єкта, який не існує в даний момент часу та в майбутньому буде створений після всебічного дослідження цифрового двійника створюється цифровий двійник-прототип [50, 54]. Отримані для цього набори даних, необхідні для опису та подальшого створення фізичного двійника, включають вимоги до фізичного двійника, тривимірну модель фізичного об'єкта, його властивостей, робочих параметрів, специфікацію матеріалів та компонентів, з яких він буде вироблений тощо. На відміну від попереднього випадку, для реального вже існуючого фізичного об'єкта, з яким його цифровий двійник буде пов'язаним протягом усього життєвого циклу або відповідному циклу дослідження фізичного двійника, створюється цифровий двійник-екземпляр [54,55].

В роботах [54,55] наведено також поняття цифровий двійник-агрегат (digital twin aggregate), яке є результатом агрегації певної сукупності цифрових двійників-екземплярів та використовується для дослідження відповідного набору (класу) фізичних об'єктів, а не окремого досліджуваного об'єкта.

Як сукупність програмного та програмно-апаратного забезпечення процесу досліджень одного або декількох реальних фізичних об'єктів описана концепція середовища цифрового двійника (digital twin environment) [55].

В [54] згідно запропонованого підходу, визначені дві основні функції цифрового двійника – функція передбачення та інформаційна функція.

Для реалізації функції передбачення, цифровий двійник прогнозує майбутню поведінку фізичного двійника. Причому, при застосуванні цифрового двійника-прототипу, прогнозування дає змогу здійснювати аналіз різних варіантів реалізації фізичного двійника, враховуючи нюанси до його фізичного створення. Під час застосування цифрового двійника-екземпляру прогнозування досягає мети як оцінювання можливих екстремальних ситуацій для фізичного двійника та моделювання змін у фізичному двійнику, враховуючи різні варіанти впливу (керування, взаємодії, перетворення) на такий фізичний об'єкт чи процес. Це дуже важлива в межах даного дослідження аргументована функція.

З інформаційною функцією цифровий двійник використовується для отримання актуальної інформації про досліджуваний об'єкт в цілому чи його окремих характеристик та властивостей.

З іншої точки зору, зазвичай в системі чи процесі співіснують різні типи цифрових двійників: цифрові двійники компонентів/частин (digital component twins/parts twins), цифрові двійники активів (Asset twins), цифрові двійники системи або блоку (System or Unit twins) та процесів (Process twins) [48].

Слід відмітити інший підхід до класифікації цифрових двійників. За рівнем інтеграції та технологій обміну даними цифрового та фізичного двійників диференціюють як «цифрову модель», як «цифрову тінь» та, саме, «цифровий двійник» [56,57]. Автори зазначають, що на відміну від цифрової моделі, при якій обмін даними (ручний чи автоматизований) між фізичним об'єктом та цифровим

об'єктом не передбачається, в цифровій тіні односторонній потік даних існує між наявним фізичним об'єктом та цифровим об'єктом, причому зміна стану фізичного об'єкта відображається на стані цифрового об'єкта, але не навпаки. Власне цифровий двійник – це таке цифрове відображення фізичного об'єкта, при якому потоки даних між існуючим фізичним об'єктом і цифровим об'єктом наявні в обох напрямках. Зміна набору властивостей фізичного об'єкта безпосередньо призводить до зміни стану цифрового об'єкта і навпаки.

Автори у [58] пропонують четверту категорію цифрових двійників, яка має автоматизований зв'язок від віртуального до фізичного об'єкта та ручний зв'язок від фізичного до віртуального з назвою «цифровий генератор». В такому разі реальний об'єкт створюється автоматично, без допомоги людини, з віртуального об'єкта.

Заслуговує на розгляд інша категоризація поняття цифрового двійника за рівнем складності чи зрілості візуальної моделі. Слід відзначити підхід в якому розрізняють цифрові двійники чотирьох рівнів від першого до четвертого: підготовчий цифровий двійник (pre-digital twin), цифровий двійник, адаптивний цифровий двійник (adaptive digital twin) та інтелектуальний цифровий двійник (intelligent digital twin). Віртуальні моделі, як правило, є загальними представленнями системи, її частини або сімейства частин, а цифровий двійник представляє екземпляр (тобто конкретну систему або процес) [59].

Розглянемо ще один підхід до класифікації цифрових двійників, представлений авторами в [60], критерії якої наведені у таблиці 1.1.

Класифікація цифрових двійників на основі наведених у таблиці 1.1. критеріїв за [60] представлена як сукупність чотирьох підкатегорій від прообразу цифрового двійника (Pre-Digital Twin), цифрової моделі (Digital Model), цифрової тіні (Digital Shadow), цифрового двійника (Digital Twin).

## Критерії для класифікації цифрових двійників

№	Критерій	Опис
1.	Наявність фізичної системи	Досліджувана цифрова модель може мати або не мати фізичного аналога, для якого вона служить як представлення.
2	Автоматичне оновлення моделі	Дані, зібрані у фізичній системі, можуть автоматично подавати цифрову модель. В іншому випадку модель буде оновлюватися інформацією з фізичної системи лише вручну за рішенням користувача.
3.	Управління фізичною системою	Інформація від виконання цифрової моделі може бути автоматично подана до фізичної системи. Інакше не буде автоматизованого зв'язку між цифровою моделлю та її фізичним аналогом.
4.	Адаптація до уподобань користувача	Адаптивний інтерфейс користувача чутливий до уподобань і пріоритетів оператора.
5.	Поінформованість про навколишнє середовище	Цифровий двійник може мати здатність до навчання розпізнавати об'єкти та моделі, які зустрічаються в робочому середовищі.

Слід зазначити, що наведені підходи до класифікації цифрових двійників необхідно використати при розробці архітектури цифрового двійника НБК на основі дослідження можливостей обміну інформацією з ІСУ.

Автори [61] використовують концепцію цифрового потоку (Digital Thread) і порівнюють її з концепцією цифрового двійника. Відзначено, що обидві моделі

мають історичну пам'ять і здатність використовувати попередні та поточні знання для отримання інформації про стан об'єкту і можливість системного прогнозу, таким чином забезпечуючи «гнучкість і можливість адаптації, необхідні для швидкого розвитку та розгортання». За своєю сутністю, цифровий потік є інформацією, яку потрібно отримати і поступово передавати протягом життєвого циклу об'єкту (процесу), що дозволить зв'язувати та інтегрувати всі аспекти системи та моделі (за допомогою загальних вхідних даних і потоків даних) завжди у доступному, актуальному, єдиному електронному представленні, до якого може отримати доступ кожен, хто приймає рішення і залучений до процесу. Потенціал цифрового двійника, що містить своєю невід'ємною частиною цифровий потік та дозволяє інтегрувати цифрове виробництво та кіберфізичні системи, є ключовим пунктом Індустрії 4.0 [62,63] та Розумного виробництва [64].

Дослідження концепції цифрових двійників містить таке поняття як життєвий цикл цифрового двійника – його прототипу, що знаходиться на фазі життєвого циклу продукту та постійно розвивається протягом нього [65-68]. Оскільки віртуальна сутність може зберігатися безперервно, її існування з часом перевершить саму фізичну сутність, що визначає її потенційну цінність для майбутнього аналізу вже після утилізації фізичної сутності.

В порівнянні із стратегією Управління життєвим циклом продукту (Product Lifecycle Management, PLM), в [69] обґрунтована різниця між PLM і цифровим двійником. Наведено, що PLM зосереджено більше на «управлінні» компонентами, продуктами та системами компанії протягом усього життєвого циклу, тоді як цифровий двійник може бути набором моделей для моніторингу та обробки даних у режимі реального часу. На відміну від цифрового двійника, стратегія PLM забезпечує структуру, яка служить єдиним джерелом істини, що з'єднує часткові моделі, що описують фізичний продукт. Моделі можуть отримувати дані, що зберігаються в системі керування даними про продукт.



В [70] зазначено існування двох можливих життєвих циклів для цифрового двійника. Перший життєвий цикл описує життя цифрового двійника, який починає існувати на етапі проектування свого фізичного двійника, якого ще не існує. Коли фізичний двійник побудований, цифровий двійник і його фізичне втілення живуть разом у безперебійному спілкуванні та взаємодії. Другий сценарій стосується цифрового двійника, який створюється, коли фізичний двійник уже працює деякий час (наприклад, у випадку виробничого пристрою, який стає підключеним пристроєм через рішення Industry 4.0). У цьому випадку цифрового двійника має бути підключено до фізичного, і вони продовжують своє життя в безперебійній взаємодії.

Слід зазначити, що і віртуальне, і фізичне середовища цифрового двійника містять засоби для вимірювання та реалізації змін стану об'єкту. Ця зміна стану фіксується за допомогою методів метрології, передається через з'єднання фізичне-віртуальне та віртуальне-фізичне й реалізується в іншому (віртуальному/фізичному) середовищі шляхом синхронізації всіх параметрів. Цей постулат дуже важливий для даної роботи, бо НБК містить велику кількість різноманітного устаткування для вимірювання показників його стану, що слід врахувати в архітектурі його цифрового двійника.

Також слід врахувати результати, які висвітлені в [71]. Враховуючи що цифровий двійник може мати багато складових, розподілених між співробітниками та галузевими партнерами, для впровадження технології є обов'язковими розробка правил і механізмів безпеки та універсальна довідкова структура цифрового двійника. Технологія дійсно залежить від своїх аналогів IoT, машинного навчання та даних, однак безшовна безконфліктна інтеграція наведених концепцій призводить до потужного та ефективного продукту, яким є цифровий двійник.

В роботі [71] автори вказали на відмінності технології цифрових двійників від інших популярних концепцій, які наведені в таблиці 1.2.

## Технологічні відмінності цифрових двійників

Назва технології	Відмінність від цифрових двійників
Симуляція	Немає двостороннього відображення в реальному часі
Машинне навчання	Немає двійників
Цифровий прототип	Компоненти IoT не обов'язкові
Оптимізація	Немає симуляції та тестів у реальному часі
Автономні системи	Немає обов'язкового самонавчання (навчання на своїх минулих результатах).
Моделювання на основі агентів	Немає дублювання в реальному часі

Також підкреслені як тематика майбутніх досліджень прогалини щодо інтеграції між віртуальними сутностями та поняття рівнів точності цифрового двійника (Levels of Fidelity) [71].

Цікавим є поняття «когнітивні цифрові двійники» (cognitive digital twin, C-DT), що є цифровими представленнями активів, систем або процесів реального світу, які мають когнітивні здібності різних типів і рівнів. Завдяки здатності навчатися, цифрові двійники стають когнітивними цифровими двійниками з функціями AI і когнітивними можливостями. До можливостей когнітивних цифрових двійників, які самонавчаються, віднесене прогнозування майбутніх станів та прийняття рішень на основі моделей, фактичних даних (як пакетних, так і потокових) і оціночних даних. У разі нестачі даних створюються синтетичні дані на основі високоточних моделей, що відображають фактичну систему [72].

У 2019 році ЄС розпочав проект H 2020 під назвою «Когнітивні установки через проактивні самонавчаючі гібридні цифрові двійники» (H 2020-EU.2.1.5.3). Цим проектом досліджується впровадження когнітивних елементів в існуючі

системи керування процесами через сприяння їх здатності до самоорганізації та пропонування рішень в умовах непередбачуваної поведінки об'єкту [73].

У майбутньому кожен процес виробництва за допомогою робота керуватиметься в режимі реального часу когнітивним цифровим двійником системи взаємодії HRC (human-robot collaboration), який виконуватиме дві основні ролі [73]:

- когнітивний ЦД (C-DT) діятиме як цифровий оркестратор, який оптимізує робочий процес виробництва відповідно до умов, що постійно змінюються (наприклад, втома працівників, виникнення несправності обладнання, помилки працівників, коригування виробничого плану або редизайн, різні замовлення клієнтів і характеристики продукту);
- когнітивний ЦД (C-DT) діятиме як цифрова копія реальної установки HRC, яку можна використовувати як середовище для випробування, для моделювання сценаріїв, підтримки обґрунтованих рішень і постійного прийняття коригувальних рішень, пов'язаних із процесом виробництва.

Оскільки НБК є великою складною системою, відзначені аспекти реалізації підтримки прийняття рішень когнітивного цифрового двійника можуть бути корисними при розробці архітектури цифрового двійника НБК.

Виходячи з проведеного аналізу, можна зробити висновок про високу складність реалізації цифрових двійників, тому необхідно провести аналіз наявних технологій для їх створення.

Достатньо розвинуті можливості для створення цифрових двійників надає платформа Microsoft Azure Digital Twins [74]. В цьому програмному середовищі мовою DTDL (Digital Twins Definition Language), яка ґрунтується на використанні формату JSON-LD, створюються відповідні моделі. Для опису поведінки моделей передбачено п'ять класів метамodelей, а саме: Telemetry, Property, Command, Relationship та Component.

В середовищі передбачені базові операції над цифровими двійниками: створення, модифікація та вилучення. Для цього використовують прикладні програмні інтерфейси DigitalTwins Application Programming Interface (API) двох рівнів – управлінського та рівня даних. Для управління екземпляром Azure Digital Twins в цілому, як то для його створення або вилучення використовується управлінський рівень. Рівень даних з визначеними категоріями DigitalTwinsModels, DigitalTwins, Query та EventRoutes використовуються для управління елементами в екземплярі Azure Digital Twins. Створювати, модифікувати та вилучати цифрові двійники у екземплярі Azure Digital Twins дозволяють інтерфейси категорії DigitalTwins. Для пошуку наборів цифрових двійників застосовують інтерфейси категорії Query. Інтерфейси маршрутизації даних містить категорія EventRoutes. Дані цифрового двійника зберігаються у сховищі Azure Data Lake [75].

Цифрові двійники зі спеціальних компонентів можуть бути об'єднані за допомогою графової моделі для створення складного цифрового двійника (конвеєрні лінії, складні вузли та агрегати). Для роботи з графовим поданням цифрового двійника призначено програмний продукт Azure Digital Twins Explorer [76], що дає можливості завантажувати моделі, задавати їх параметри та встановлювати зв'язки між компонентами сформованого цифрового двійника. Засоби Azure Synapse Analytics застосовуються для аналізу даних.

Цифрову модель усього виробничого процесу дозволяє створити платформа Seebo Process-Based Artificial Intelligence™ [77]. Платформа Seebo працює в центрах обробки даних Microsoft Azure, які гарантують конфіденційність даних механізмами захисту даних самого сховища, підтримують кілька визнаних у галузі сертифікацій, зокрема FedRAMP, ISO, SOC тощо. Кілька рівнів контролю безпеки захищають доступ до середовища та всередині нього, включаючи брандмауери, системи захисту від вторгнень, біометричний контроль доступу та сегрегацію мережі [77].

Для розробки цифрових двійників в різних галузях промисловості використовується програмне забезпечення Simio Simulation та Simio Process Digital Twin, на основі якого реалізують ключові операційні концепції Industry 4.0, такі як моделювання на основі даних, оцінювання та тестування операційних процесів і наскрізна оптимізація процесів. Для створення візуальної ієрархічної моделі може бути використана стандартна бібліотека об'єктів та компонентів. Усі продукти Simio для побудови моделей безпосередньо інтегруються з Google Warehouse [78,79].

Серед визнаних розробників програмного забезпечення Digital Twins окремо слід відзначити Siemens. Безсумнівно, як одна з найвпливовіших компаній у галузі, вони розробляють інструменти, що використовуються промисловістю у всьому світі. Їхня платформа Mindsphere є стандартом де-факто для багатьох галузей і забезпечує повну підтримку Digital Twins, збираючи дані з підключеного IoT [80].

Програмне забезпечення Siemens EcoDomus підтримує створення, супроводження та візуалізацію цифрових двійників будівель на основі інформаційного моделювання будівель (Building Information Modeling, BIM). Воно акумулює дані про проектування та будівництво доступних для експлуатації та обслуговування будівель, а також про вдосконалення в подальшому способів управління будівлями, застосовуючи датчики, лічильники Building Management Systems (BMS) та інші модернізації. Віртуалізація об'єктів з прив'язкою до інфраструктури в EcoDomus інтегрується з іншими середовищами та системами BIM, SCADA, ERP (enterprise resource planning) [81], GIS, IoT, CMMS та інших. Рішення Simcenter дозволяє використовувати сторонні обробники даних та дані сторонніх розрахункових пакетів, так як і створені безпосередньо в модулях Simcenter [82].

Цифровий двійник у галузевих процесах, описаних Siemens, інтегрується в програмне забезпечення ERP, подібне до того, яке надає SAP. Середовище SAP

Digital Manufacturing Integration and Intelligence, яке містить технологію цифрових двійників, взаємодіє із системами ERP цього розробника, які включають локальні та хмарні системи. Поєднання доступні для широко вже розповсюджених: SAP ERP, SAP S/4HANA та SAP S/4HANA Cloud [83].

Серед інших прикладів програмного забезпечення, що призначене для впровадження технології цифрових двійників є CosmoTech Enterprise Digital Twin [84], Digital Twin Machining [85], Autodesk Digital Twin [86], SolidWorks [87], aPriori Digital Product Twins [88], aPriori Digital Process Twins [89], aPriori Digital Factory Twins [90], DigitalClone for Engineering [91], SPHINX Open [92], NEXOSPACE [93], Proficy CSense GE Digital [94], Operations Performance Management (OPM) GE Digital [95], Predix Platform GE Digital [96].

Також частково підтримує технологію цифрових двійників програмна платформа IBM® Watson™ IoT Platform [97]. Від набору датчиків програмне забезпечення дозволяє отримувати дані про об'єкт дослідження. Дані, що отримуються від давачів у реальному часі, зберігаються у NoSQL базі даних [98], які можуть містити JSON, текстовий формат та формат для збереження геопросторових даних. У хмарному сховищі, організованому за технологією Data Lake зберігаються дані, які потребують аналізу [99]. Дані, які потребують зберігання тривалий час, зберігаються у хмарному сховищі об'єктів IBM Storage FlashSystem [100].

Цифрові двійники пристроїв промислових IoT можуть розроблятися у середовищі CloudPlugs за допомогою відповідних програмних продуктів Edge One™, SmartPlug™, PicoPlug™ або бібліотек MQTT і REST [101].

Програмне середовище Amazon Web Services IoT TwinMaker (AWS IoT TwinMaker) використовується для створення цифрових двійників реальних систем та є достатньо гнучким для імпорту існуючих 3D-моделей з файлів файли CAD, систем автоматизованого проектування (САПР) інформаційного моделювання будівель (BIM) [102]. Віртуальна модель є графом, який структурує

та організовує інформацію про цифрового двійника для полегшення доступу та розуміння. Дані для обробки витребують із різних джерел даних, таких як датчики обладнання, відеоканали та бізнес-додатки, для чого система надає спеціалізовані API. Передбачений конструктор сцени AWS IoT TwinMaker і визначені прості 3D-інструменти використовують для імпорту візуальних ресурсів в сцену та розташування їх відповідно до фізичного середовища, наприклад фабрики та її обладнання. Інтерактивне накладання відео та даних датчиків із підключених джерел даних, аналітичну інформацію з підключеного машинного навчання (ML) і служб моделювання, а також позначки про технічне обслуговування та робочі документи надають актуальну просторову візуалізацію [103].

Доступ до цифрового двійника та взаємодію з ним забезпечує низький рівень коду для створення веб-додатків, який постачається з плагіном для Grafana, популярної інформаційної панелі та платформи візуалізації з відкритим кодом від Grafana Labs [104]. Плагін надає користувацькі панелі візуалізації, включаючи засіб перегляду 3D-сцени та шаблони інформаційної панелі, а також компонент джерела даних для підключення до користувацьких даних цифрового двійника, що дозволяє швидко створювати програми з підтримкою 3D для ваших конкретних потреб. Плагін також можна використовувати для створення програм (логічно ізольованих серверів Grafana) за допомогою повністю керованої служби з відкритим кодом Amazon Managed Grafana [105].

Взаємодія між обробниками дозволяє витребувати, отримувати, візуалізувати та інтерпретувати показники. Гнучкість забезпечує інтегрованість з джерелами даних AWS, які збирають операційні дані, такими як Amazon CloudWatch, AWS X-Ray, Amazon OpenSearch Service, Amazon Timestream, AWS IoT SiteWise, і Amazon Managed Service for Prometheus. Вбудовані функції безпеки для відповідності вимогам корпоративного управління, включаючи

єдиний вхід, контроль доступу користувачів та груп до даних та аудиторську звітність.

Інтеграція програмного та апаратного забезпечення для просторових даних, віртуальних даних 3D-середовища для геологічного моделювання та оптимізації видобутку, лазерні сканери великої дальності для 3D-картографування та моніторингу від Maptek надає доступ для цифрових двійників MAXTA Drill & Blast® PETRA, MAXTAGeomet®. Результати охоплюють рішення від геологічного моделювання до оптимізації та моделювання процесів переробки [106–108].

Створення, перевірка та розгортання гібридних цифрових двійників обладнання та процесів доступні в Ansys Twin Builder [109,110]. Поєднання IoT із симуляціями, які формують основу цифрового двійника можна використати для покращення роботи обладнання та реалізації процесу його проектування. Зв'язок із цифровим двійником через технологію моделювання HyperWorks від Altair та технології Carriots IoT є можливим завдяки з'єднанню апаратного забезпечення пристрою з хмарою, програмним забезпеченням для моделювання/аналітики даних і кінцевих користувачів [111].

Слід зазначити, що розглянуті засоби та технології розробки цифрових двійників є достатньо універсальними, використовують для збереження інформації хмарні сервіси, реалізують можливості аналізу, прогнозування та 3D візуалізації даних щодо геометрії об'єкту та його стану. Однак, незважаючи на наведені широкі можливості цього програмного забезпечення, НБК є унікальним надвеликим об'єктом підвищеної небезпеки, дані про функціонування якого не можуть зберігатися в сторонніх хмарних сервісах. Тому розробка адаптованого під НБК програмного забезпечення, формування архітектури цифрового двійника, яка за своїми можливостями дозволить розвивати продовж тривалого періоду процеси супроводження його експлуатації є актуальними і потребує деталізації наукового завдання.



#### 1.4 Постановка наукового завдання дослідження

Проведений аналіз показав, що 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. Слід відмітити, що наявні інформаційні системи НБК мають недостатні можливості стосовно 3D візуалізації інформації, прогнозування та підтримки прийняття рішень.

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 можна обрати технологію цифрових двійників. Беручи до уваги необхідність врахування специфіки та обмежень цього об'єкту, актуальним є вирішення наукового завдання з розробки архітектури, методу і програмного забезпечення обробки даних цифрового двійника НБК ЧАЕС.

Метою даного дослідження є покращення можливостей обробки даних для аналізу і управління станами НБК ЧАЕС шляхом розробки пов'язаних за єдиними

концептуальними підходами архітектури, методів, моделей та програмних засобів його цифрового двійника.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні часткові завдання:

- аналіз призначення та основних характеристик НБК;
- дослідження сучасних підходів до моделювання та управління процесами НБК;
- огляд концепції та особливостей побудови цифрових двійників;
- дослідження архітектури та функціональних можливостей обробки даних інтегрованої системи управління НБК;
- моделювання та автоматизація управління вентиляційними системами НБК;
- формування вимог до цифрового двійника НБК та розробка його архітектури;
- розробка моделі баз даних та знань цифрового двійника НБК;
- створення програмного забезпечення прототипу модуля 3D візуалізації стану НБК.

Слід зазначити, що дане дослідження має певні обмеження, а саме те, що розробка програмного забезпечення та перевірка його на працездатність можлива лише на основі відкритих і доступних історичних даних НБК.

## **Висновки до розділу 1**

1. Основним призначенням НБК є захист довкілля від радіоактивного забруднення та створення умов для перетворення ОУ в екологічно безпечну систему. Це унікальний об'єкт, що відноситься до класу великих і складних систем. Беручи до уваги значну кількість задач, в яких персонал має приймати

рішення щодо управління процесами НБК в умовах впливу різноманітних факторів, враховуючи радіаційну та ядерну безпеку, інформаційні системи НБК мають відповідати високим вимогам щодо швидкості, точності й надійності виконання функцій, мати можливості до розвитку та удосконалення.

2. Дослідження сучасних підходів до моделювання та управління процесами НБК показало, що наявна досить велика кількість моделей, які дозволяють прогнозувати та оцінювати його різні характеристики, хоча вони не утворюють єдиної інтегрованої системи моделювання. Інформаційні системи НБК дозволяють реалізувати 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. Для подолання цих недоліків доцільне застосування технології цифрових двійників.

3. Огляд концепції цифрових двійників дозволив визначити їх основні види та напрями застосування, а саме: інтелектуалізація управління експлуатацією об'єктів, навчання персоналу, візуалізація інформації, прогнозування, підтримка прийняття рішень, запобігання надзвичайних ситуацій та їх подолання. Існує достатньо велика кількість програмних продуктів для побудови цифрових двійників, але вони не враховують в повній мірі специфіку НБК, що робить актуальним розробку архітектури, методів, моделей та програмних засобів обробки даних цифрового двійника НБК на єдиній концептуальній основі. Зазначене визначило постановку наукового завдання даного дослідження.

## **РОЗДІЛ 2**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ДАНИХ НБК**

НБК є великою складною системою, тому розробка алгоритмів та програмних засобів для обробки даних цифрового двійника НБК має спиратися на формальне представлення його характеристик та процесів. Як зазначено в розділі 1, для моніторингу стану та управління процесами НБК вже розроблена та використовується спеціалізована інформаційна система ІСУ. Беручи до уваги необхідність врахування особливостей ІСУ НБК під час проектування його цифрового двійника та вказану в підрозділі 1.2 потребу в автоматизації управління вентиляційними системами НБК, в даному розділі проведено детальний аналіз структури та функціональних можливостей ІСУ та виконане моделювання та розроблено підходи до автоматизації управління вентиляційними системами НБК.

#### **2.1 Дослідження архітектури та функціональних можливостей обробки даних інтегрованої системи управління НБК**

Як було зазначено в попередньому розділі, НБК є складною інженерною спорудою, що містить велику кількість устаткування, обладнання. Зрозуміло, що функціонування НБК потребує контролю та управління великою кількістю параметрів з метою підвищення радіаційної, ядерної, промислової безпеки та безпеки навколишнього середовища, посилення його аварійної готовності.

Побудова та функціонування цифрового двійника НБК має спиратися на наявну інфраструктуру збору та обробки інформації, яка реалізована в існуючій інтегрованій системі управління НБК та його системах автоматики і управління.

ІСУ НБК призначена для контролю та управління виробничим процесом з перетворення зруйнованого енергоблоку №4 ЧАЕС в екологічно безпечну систему, що включає вилучення ядерного палива, що залишилося, і паливних матеріалів, роботи по поводженню з радіоактивними відходами та демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» з використанням мінімального числа персоналу, забезпечуючи при цьому виконання вимог ядерної, радіаційної, пожежної та промислової безпеки [25].

Архітектура ІСУ виконана дворівневою, розподіленою, відкритою, що має функціональну конфігурацію, яка дозволяє керувати будь-якою підсистемою незалежно від інших систем. Верхній рівень ІСУ включає технічні засоби людино-машинного інтерфейсу, робочі станції з моніторами, панель аварійного відключення, сервери, принтери, панелі, що відображають аварійні і критичні сигнали для експлуатації. Нижній рівень ІСУ включає набір підсистем контролю, їх технічні засоби та програмні засоби (програмовані логічні контролери, датчики, електроприводи запірної і регулюючої арматури та механізмів, комутаційні шафи та ін.) [19].

Структурно-логічна схема функцій ІСУ наведена на рисунку 2.1.

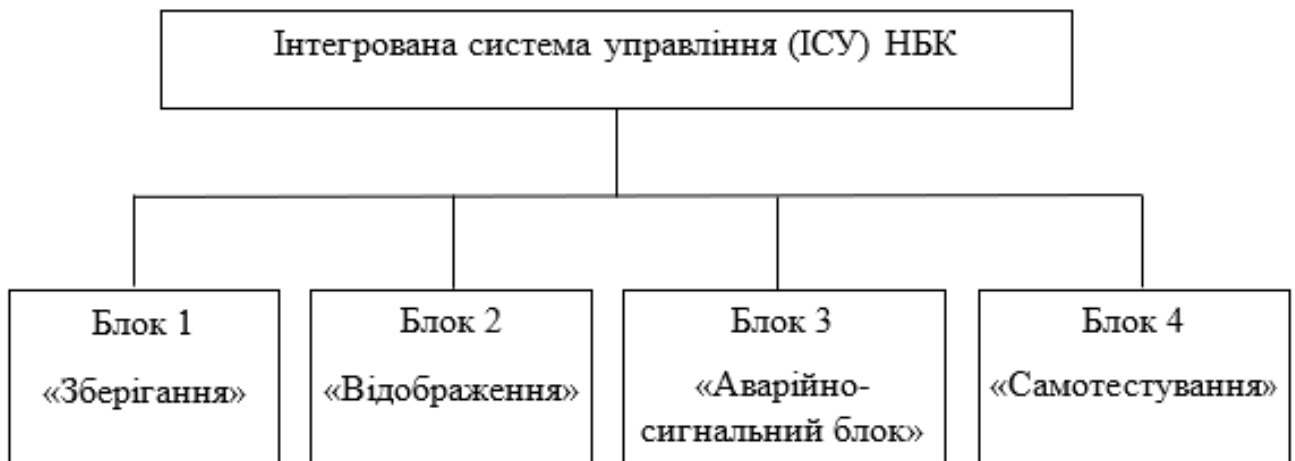


Рис. 2.1. Структурно-логічна схема ІСУ НБК

Відповідно до рисунку 2.1, основні функції ІСУ НБК можна розділити на чотири блоки.

До першого блоку «Зберігання» включені функції:

- збирання, обробки, передачі, реєстрації, запису та зберігання інформації, отриманої від інформаційних систем нижнього рівня;
- реєстрація часу появи заходів та аварійних сигналів;
- отримання, реєстрація та виконання запитів користувача по роботі з інформацією (це пошук обраних графічних зображень, введення та зміна даних у базі даних).

В блоці 2 «Відображення» містяться:

- зручне для користувача відображення даних;
- централізоване відображення контрольованих параметрів та інформації щодо доступності кожної підсистеми контролю (ПСК);
- інформаційне забезпечення користувача шляхом надання доступу як до внутрішніх, так і до зовнішніх джерел інформації.

Аварійно-сигнальний блок передбачає:

- доведення до користувача ІАСК заходів та аварійних сигналів, що подаються з підсистем контролю (ПСК);
- відновлення інформації від ПСК до інтегрованої бази даних системи після відновлення її нормального режиму роботи;

Блок 4 «Самотестування» містить набір функцій контролю стану елементів системи верхнього рівня, каналів та ліній зв'язку.

Основною особливістю побудови ІСУ є злиття технічних та програмних засобів у єдину систему з використанням єдиної бази даних. Дані вводяться лише один раз, після чого стають доступними для всіх технічних засобів. Усі операції виконуються з використанням єдиного інтерфейсу та єдиних інструментальних засобів.

Після закінчення будівництва НБК ІСУ було інтегровано з раніше розробленою інтегрованою автоматизованою системою контролю (ІАСК) та інтегрованою базою даних ОУ.

До основних підсистем ІАСК ОУ відносяться [19]:

- підсистема контролю ядерної безпеки (СК ЯБ);
- стаціонарна система радіаційного контролю (СС РК);
- підсистема контролю стану будівельних конструкцій (СК СБК);
- підсистема сейсмічного контролю (ССК).

Основними функціями СК ЯБ є контроль стану місць скупчень ядерного палива у приміщеннях за допомогою вимірювання щільності потоку нейтронів (ЩПН) та потужності експозиційної дози випромінювання (ПЕД), видача попереджувальних сигналів, якщо контрольовані параметри наближаються або перевищують встановлені експлуатаційні межі.

Допоміжною функцією СК ЯБ можна вважати контроль параметрів радіаційної безпеки поза межами НБК в зоні керованого викиду повітря з НБК.

До комплексу технічних засобів СК ЯБ входить 1 пристрій збору даних (ПЗД), 6 пристроїв зв'язку з об'єктом (ПЗО), локальна шина, що з'єднує ПЗО та ПЗД, 19 блоків нормуючих підсилювачів та 19 блоків датчиків, у кожен із яких входить датчик ЩПН і датчик ПЕД  $\gamma$ -випромінювання.

Стаціонарна система радіаційного контролю (СС РК) є складовою ІАСК і відноситься до систем, особливо важливих для безпеки. Вона спроектована з метою виконання функції радіаційного захисту персоналу та населення, контролю виходу радіоактивних речовин та іонізуючого випромінювання за встановлені межі.

СС РК забезпечує контроль параметрів радіаційної обстановки у приміщеннях постійного перебування персоналу та приміщеннях періодичного перебування і пересування персоналу, а також обробляє інформацію про

радіаційну обстановку на межах радіаційно-небезпечних зон та викиди з ОУ в навколишнє середовище через нову вентиляційну трубу (НВТ) НБК.

СС РК контролює такі параметри радіаційної безпеки у відповідних точках контролю (див. рис. 2.2):

- ПЕД;
- концентрацію (об'ємну активність)  $\alpha$ - та  $\beta$ -аерозолів у повітрі;
- активність газоаерозольного викиду через систему «Байпас» НВТ.

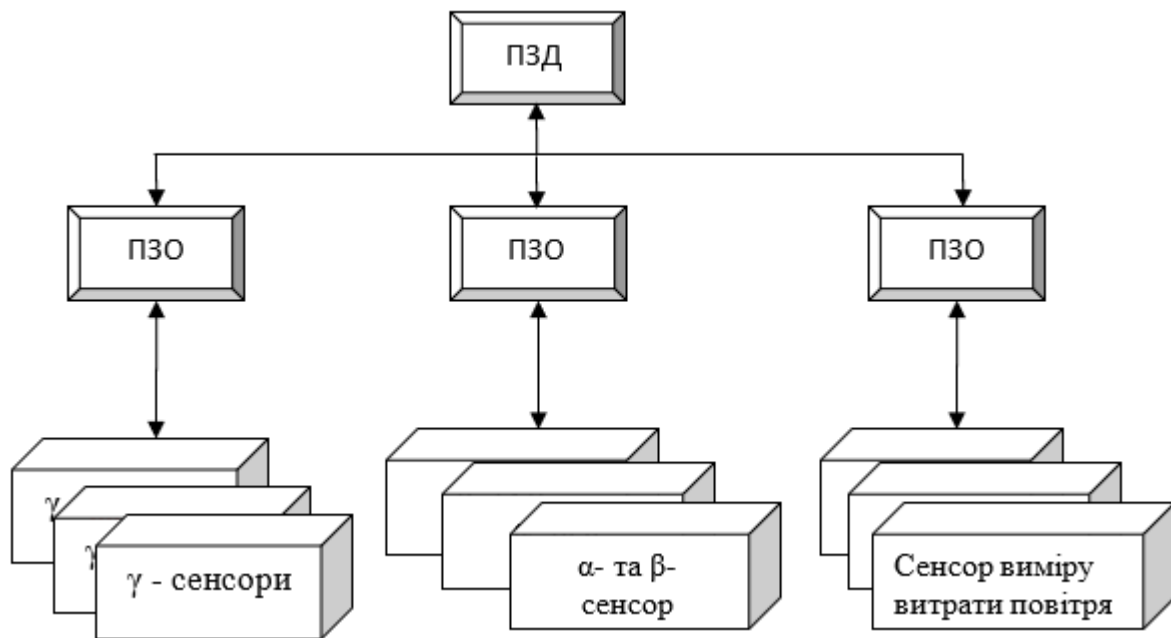


Рис. 2.2. Загальна схема СС РК

Система СС РК заснована на відкритій архітектурі та включає: сенсори вимірювання потужності дози  $\gamma$ -випромінювання; сенсори визначення активності  $\alpha$ - та  $\beta$ -аерозолів; датчики витрати повітря в системі «Байпас» НВТ, ПЗО, ПЗД. Як видно з рисунку 2.2, на верхньому рівні СС РК знаходиться ПЗД, який отримує всю інформацію, що надходить від усіх датчиків підсистеми, та виконує контроль приєднаних до нього ПЗО. На рівні нижче знаходяться ПЗО, які забезпечують збір даних та контроль датчиків, отримання та нормалізацію даних, перевірку порогів та оцінку трендів. Комп'ютер кожного ПЗО контролює також локальну



сигналізацію про відмови або збільшення рівнів радіації, чи тенденції, пов'язані з перевищенням уставок. Вся інформація щодо кожної точки вимірювання відображається на екрані оператора. У разі перевищення порогів безпечної експлуатації персонал буде негайно повідомлено сигналом тривоги з визначенням місця знаходження датчика, який подав цей сигнал тривоги.

Основним завданням СК СБК є контроль за станом будівельних конструкцій, який ведеться з метою зниження дозових навантажень на персонал та отримання інформації в реальному масштабі часу про зміни в деформаціях, що відбуваються в реперних вузлах та конструкціях об'єкта. Для виконання цього завдання СК СБК виконує контроль параметрів діагностованої зони за допомогою вимірювання вібрації, відносної лінійної деформації/натягу, лінійного зміщення, кутів нахилу, контактного тиску та температури, та здійснює видачу попереджувальних сигналів у разі виявлення статистично суттєвої зміни контрольованих параметрів.

У 2010 – 2014 роках на ЧАЕС було реалізовано проект із створення сучасної автоматизованої системи сейсмічного контролю (ССК). Її мережа здійснює безперервну цифрову реєстрацію сейсмічних коливань та оперативну обробку даних. Основним завданням ПС СК є контроль сейсмічних подій на майданчику ЧАЕС, включаючи місцеву сейсмічність, геонебезпечні процеси в зоні розташування ОУ та переміщення ґрунту у випадках місцевих або віддалених землетрусів.

На виконання цих завдань ССК виконує такі основні функції:

- вимірювання вібрації ґрунту на території, що прилягає до майданчика ЧАЕС за допомогою мережі сейсмічних спостережень;
- зберігання даних, що характеризують сейсмічні події, що відбулися у межах майданчика ЧАЕС;
- оповіщення персоналу про землетрус, сила якого перевищує встановлені межі.

Таким чином, ІСУ являє собою розподілену за технологічним, функціональним та територіальним принципом систему, в яку інтегруються підсистеми контролю та управління (ПСК) різного призначення та функцій, що охоплює [25]:

- систему основних кранів (СІК);
- будівельні конструкції та фундаменти НБК;
- систему опалення, вентиляції та кондиціювання повітря (ОВКВ);
- систему електропостачання та електрообладнання (СЕЕО);
- системи водопостачання та каналізації;
- систему стисненого повітря;
- систему рідких радіоактивних відходів;
- систему внутрішнього транспорту;
- мобільну систему пилоподавлення;
- вентиляційну трубу.

ІСУ також взаємодіє з системами пожежного захисту та контролю доступу. Системи функціонують незалежно та забезпечують збір, обробку, накопичення, відображення, аналіз, архівування одержуваної інформації, видачу звітної інформації, сигналізацію про досягнення та перевищення встановлених експлуатаційних меж контрольованих параметрів, передачу оброблених даних до системи верхнього рівня ІСУ.

Управління технологічними процесами здійснюється з використанням програмованої обчислювальної техніки, що включає:

- автоматизовані робочі місця (АРМ);
- серверне обладнання;
- програмовані логічні контролери (ПЛК);
- мережеве обладнання;
- програмне забезпечення.

Нажаль, в період перебування окупаційних підрозділів збройних сил рф багато з підсистем зазнали значних ушкоджень і потребують відновлення, що дає додаткові можливості для їх удосконалення, в тому числі на основі застосування технології цифрових двійників.

Крім того, слід зазначити, що ІСУ має обмежені можливості щодо візуалізації інформації (в тому числі 3D), не забезпечує в повній мірі підтримку прийняття рішень співробітниками, що керують процесами НБК [10]. Наприклад, контроль та керування системою опалення, вентиляції та кондиціювання повітря, яка входить до складу ІСУ, передбачає визначення операторами необхідних витрат вентиляційних установок, що робить актуальною задачу моделювання та автоматизації цього процесу.

## **2.2 Моделювання та автоматизація управління вентиляційними системами НБК**

### **2.2.1 Характеристика задачі управління вентиляцією НБК**

Існуючі підходи до управління вентиляційними системами НБК націлені на мінімізацію неконтрольованих витоків повітряних мас разом з радіоактивними аерозолями з його основного об'єму (ОО) до кільцевого простору (КП), а звідти до навколишнього середовища через наявну мережу протічок [2,11,12]. Значення площ протічок були теоретично оцінені під час проектування НБК на момент початку та в кінці 100-річного терміну експлуатації об'єкту, однак після проведення в 2017-18 роках гідравлічних тестів було встановлено, що наявні на той час площі протічок вже значно перевищували їх значення, що мали бути в кінці терміну експлуатації НБК. Є прогнози, що значення наявних площ протічок

з часом будуть суттєво збільшуватись [40]. На рисунку 2.3 наведено умовну гідравлічну схему руху повітряних мас НБК [41].

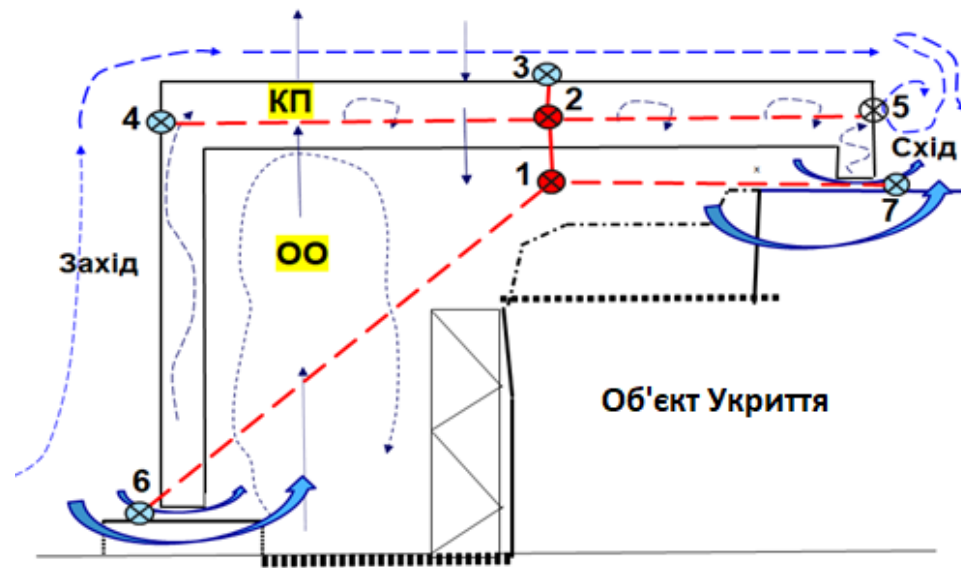


Рис. 2.3. Умовна гідравлічна схема перетікання повітряних мас НБК у поздовжньому перерізі: 1 – вузол ОО, 2 – вузол КП, 3 – вузол на зовнішній циліндричній поверхні, 4 – вузол на зовнішній поверхні західної стіни, 5 – вузол на зовнішній поверхні східної стіни, 6 – вузол на зовнішній частині західних протічок, 7 - вузол на зовнішній частині східних протічок [41]

Як видно на рисунку 2.3, повітряні маси надходять до КП та ОО та видаляються з них системою вентиляційних установок, розташованих на циліндричній поверхні НБК, його східній та західній стіні, також наявний рух повітряних мас через протічки, розмір яких точно не визначено.

Особи, що керують вентиляційними установками НБК, приймають рішення щодо визначення обсягів витрат повітря, виходячи з поточних даних про кліматичні умови (напрямок та швидкість вітру), тиски в ОО та КП, витрат вентиляторів в КП та ОО. Створення цифрового двійника НБК передбачає розробку моделі управління його вентиляційною системою [2,12]. Враховуючи

складність процесу та наявність невизначеності для створення цієї моделі доцільно застосувати інтелектуальні інформаційні технології на основі нечіткої логіки. Існуюча інформаційна система управління НБК містить історичні дані щодо прийнятих рішень по управлінню вентиляційними установками, тому можна розглянути використання апарату нейро-нечітких мереж, у яких процес виведення виконується на основі методів нечіткої логіки, але побудова відповідних функцій належності відбувається з використанням методів навчання нейронних мереж, що спрощує розробку моделі. Використання нейро-нечітких мереж дозволить враховувати нестаціонарність НБК, яка проявляється у зміні площ протічок, бо її структура забезпечує можливість адаптації моделі завдяки представленню системи нечіткого логічного виведення у вигляді нейронної мережі, зручної для навчання, поповнення та аналізу. Враховуючи результати порівняльного аналізу застосування різних типів нейро-нечітких систем, наявність та доступність інформаційних технологій для їх реалізації, для моделювання управління вентиляційними установками НБК було обрано запропоновану R. Jang адаптивну систему нейро-нечіткого виводу (ANFIS), реалізовану засобами MATLAB [2,112,113].

Мережа ANFIS реалізує систему нечіткого виведення Такагі-Сугено у вигляді п'ятишарової нейронної мережі прямого поширення сигналу. Узагальнена структура мережі ANFIS наведена на рисунку 2.4. Перший шар мережі містить нейрони, які відповідають термам вхідних лінгвістичних змінних. В якості функцій належності термів, спираючись на результати нечіткої кластеризації статистичних даних про прийнятті рішення по управлінню вентиляційними установками, обрано функції Гауса. Другий шар містить нейрони, які обробляють значення виходів вузлів першого шару, що формують антецеденти правил. Кожен нейрон другого шару визначає ступінь виконання відповідного правила бази знань.

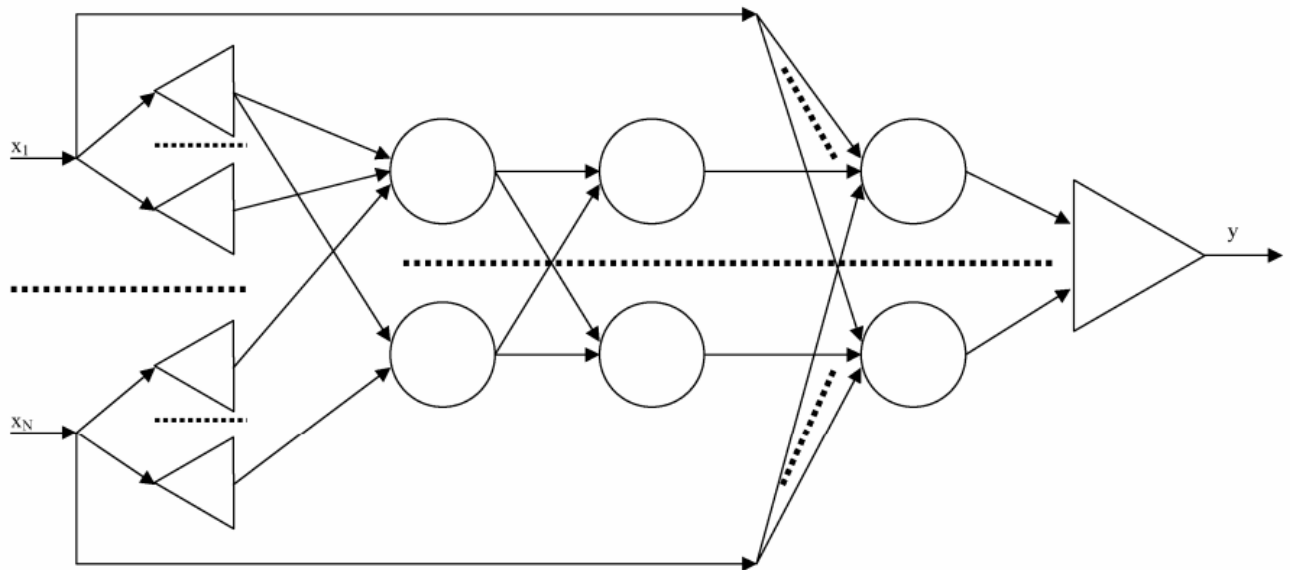


Рис. 2.4. Узагальнена структура нейро-нечіткої мережі ANFIS [114]

Третій шар складається з нейронів, що знаходять нормалізовані ступені виконання правил, а четвертий шар обчислює консеквенти правил. П'ятий шар містить лише один нейрон, який розраховує кінцевий результат роботи мережі.

Одним з найважливіших компонентів системи управління на основі нечіткої логіки є база знань, яка представляє собою колекцію нечітких правил "якщо-то", що визначають зв'язок між входами та виходами досліджуваної системи.

В роботі для застосування в системі ANFIS використана база правил Такагі-Сугено з лінійними функціями в якості консеквентів, що мають наступний узагальнений вид [2]:

$$R_i: \text{IF } x_1 \text{ is } A_1 \text{ AND } x_2 \text{ is } A_2 \dots x_n \text{ is } A_n \text{ then } y_i = b_{i1}x_1 + \dots + b_{in}x_n + b_{i0} \quad (2.1)$$

де  $R_i$  – правило з номером  $i$  бази знань нечіткого логічного виведення;  $x_1 \dots x_n$  – вхідні змінні, що характеризують стан об'єкту управління;  $A_1 \dots A_n$  – терми вхідних лінгвістичних змінних, яким відповідають нечіткі змінні з певними

функціями належності  $\mu_1(x_1) \dots \mu_n(x_n)$ , за допомогою яких значення виразу  $x_k$  is  $A_k$  розраховується як  $\mu_k(x_k)$ ;  $y$  – вихідна змінна, що визначає керування об'єктом управління;  $b_{i0}, b_{i1} \dots b_{in}$  – параметри лінійної функції, що визначає значення керуючої змінної за правилом  $R_i$ .

В моделі, представленій формулою (2.1), антецедент являє собою нечітке висловлювання, а консеквент – чітку функцію. Систему нечіткого виведення Такагі-Сугено можна розглядати як комбінацію лінійної та регресійної моделей. Консеквенти правил мають однакову структуру, лише параметри лінійних функцій для кожного правила в загальному випадку різні. Таку модель можна розглядати як кусково-лінійну апроксимацію нелінійної функції управління.

Основними показниками, які визначаються особами, що приймають рішення з управління системою вентиляції НБК, є витрати повітря для КП та ОО. Враховуючи, що ANFIS дозволяє будувати системи нечіткого логічного виведення лише для однієї вихідної змінної, для розрахунку витрат повітря для КП та ОО необхідно розробити дві окремі моделі.

### **2.2.2 Нейро-нечітке моделювання витрат повітря вентиляційних установок кільцевого простору НБК**

Як зазначено в підрозділі 2.2.1, особи, що приймають рішення з управління вентиляційними установками, визначають витрати повітря кільцевого простору (КП) НБК на основі даних про напрям та швидкість вітру, а також на основі інформації про перепади тиску в КП та ОО стосовно оточуючого середовища. Враховуючи це, розроблено структуру системи нечіткого логічного виведення ANFIS для управління витратами повітря КП [2,12]. Представлення цієї структури в редакторі ANFIS наведено на рисунку 2.5.

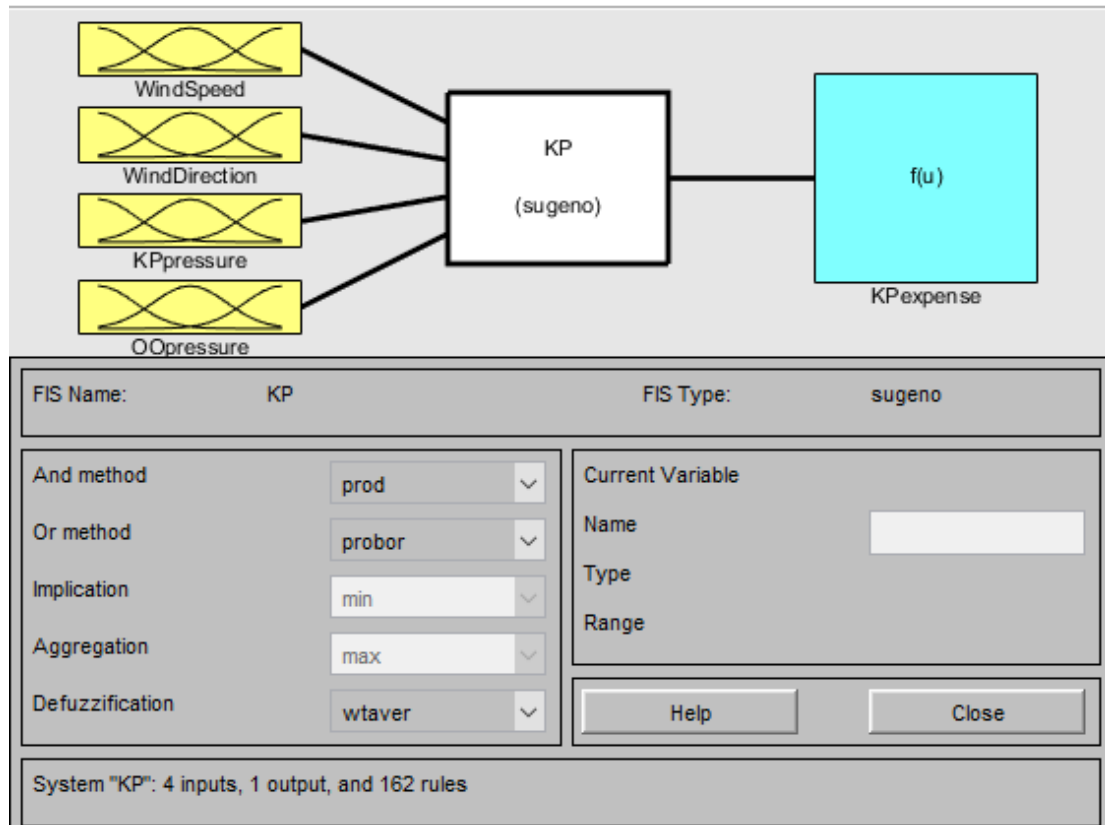


Рис. 2.5. Структура моделі управління витратами повітря КП

Як видно на рисунку 2.5, витрати вентиляційних установок КП визначаються швидкістю та напрямом вітру, перепадами тиску КП та ОО з оточуючим середовищем. Для навчання нейро-нечіткої мережі було використано статистичні дані про значення входних змінних та відповідні рішення операторів про визначення витрат вентиляційних установок КП. Розмір статистичних даних становив 25170 записів. Спираючись на результати формування функцій належності термів з застосуванням нечіткої кластеризації, в якості базового типу функцій належності обрано функції Гауса. Кількість термів лінгвістичних змінних визначено методом підбору, намагаючись досягнути хороших показників точності при прийнятній швидкості обчислень під час навчання системи. Загалом було проведено 15 підходів до навчання по два кроки в кожному. Результати навчання наведено на рисунку 2.6.



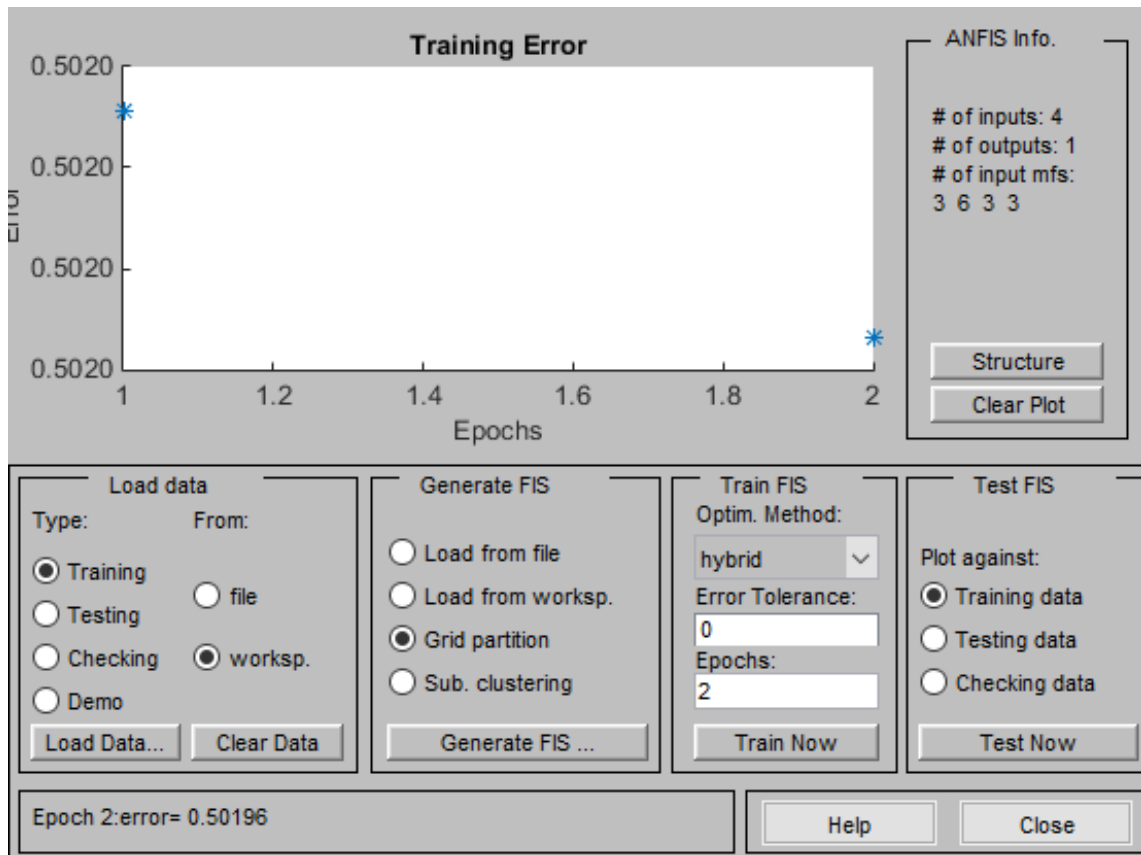


Рис. 2.6. Результати навчання нейро-нечіткої моделі для управління витратами повітря КП

Як видно на рисунку 2.6, навчання здійснювалося гібридним методом оптимізації, який дозволив отримати показник середньоквадратичної точності 0,50196, що відповідає відносній похибці приблизно у 3,7% [2]. Враховуючи повільне покращання точності навчання, воно було зупинене на вказаних показниках, бо вони достатні для вирішення задач моделювання та управління цим процесом. Однак в подальших дослідженнях можливе покращання показників точності навчання моделі за умови збільшення кількості циклів навчання та застосування більш потужних обчислювальних ресурсів для скорочення тривалості циклу навчання (для навчання використовувався комп'ютер Intel(R) Core(TM) i7-8550U CPU 1.80GHz, оперативна пам'ять 16Гб).

Відповідно до загального виду правил бази знань (2.1), в умовах правил використовується нечітка логічна операція кон'юнкції. Під час навчання ANFIS на основі статистичних даних було сформовано 162 правила нечіткого логічного виведення, що дозволяють розраховувати на основі методу Такагі-Сугено значення витрат повітря КП. Частина правил в якості прикладу наведено на рисунку 2.7.

The screenshot displays the ANFIS rule editor. At the top, a list of rules is shown, with Rule 1 selected: "1. If (WindSpeed is in1mf1) and (WindDirection is in2mf1) and (RSpresure is in3mf1) and (MSpresure is in4mf1) and (RSexpense is out1mf1)". Below this, the detailed configuration for Rule 1 is shown. It consists of five input variables: WindSpeed, WindDirection, RSpresure, MSpresure, and RSexpense. Each variable has a dropdown menu for selecting a fuzzy membership function (mf1, mf2, mf3, mf4, mf5, mf6) or 'none'. The 'not' checkbox is present for each variable but is currently unchecked. The 'Connection' section shows the 'and' operator selected. The 'Weight' is set to 1. At the bottom, there are buttons for 'Delete rule', 'Add rule', 'Change rule', 'Help', and 'Close'. The 'FIS Name' is set to 'RS'.

Рис. 2.7. Приклад правил для нечіткого управління витратами повітря вентиляційними установками КП

На рисунках 2.8 та 2.9 наведені графіки функцій належності термів вхідних лінгвістичних змінних швидкості та напрямку вітру відповідно.

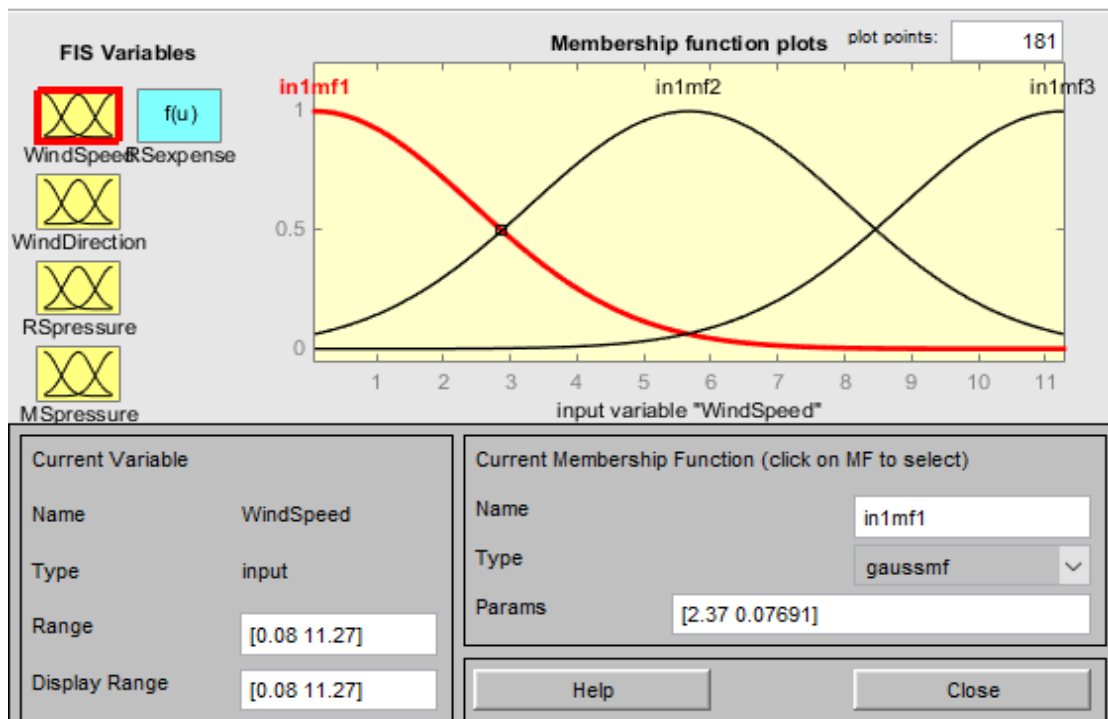


Рис. 2.8. Функції належності термів вхідної лінгвістичної змінної «Швидкість вітру»

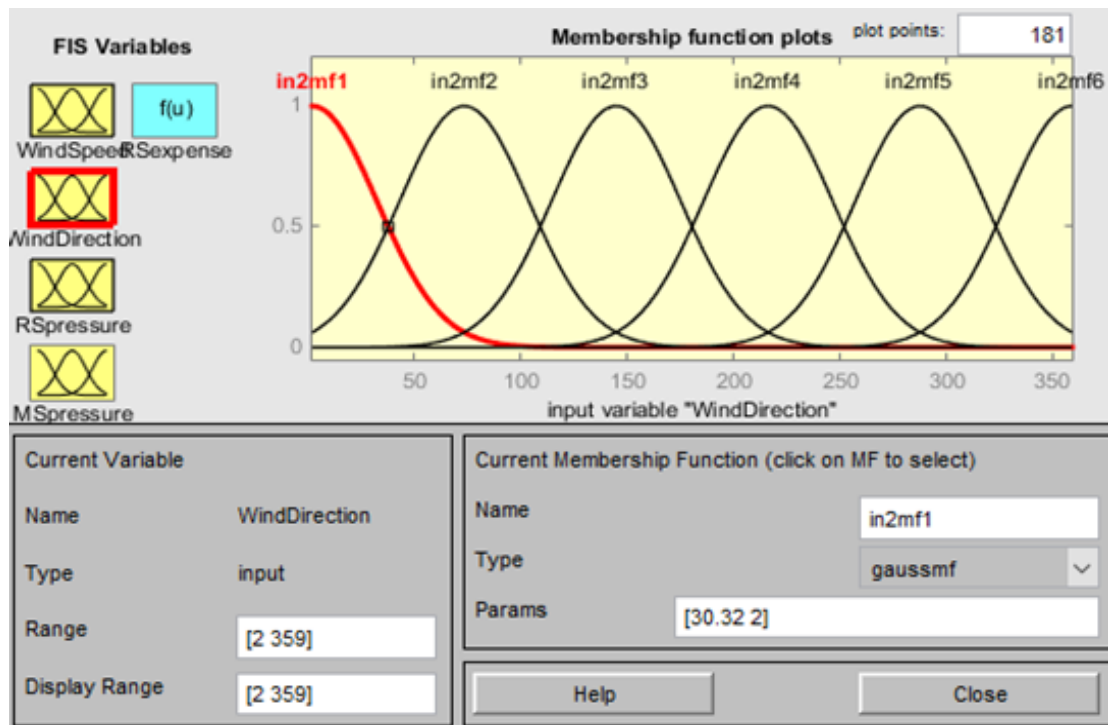


Рис. 2.9. Функції належності термів вхідної лінгвістичної змінної «Напрямок вітру»

На рисунку 2.10 наведено графік залежності витрат вентиляційних установок КП від швидкості та напрямку вітру.

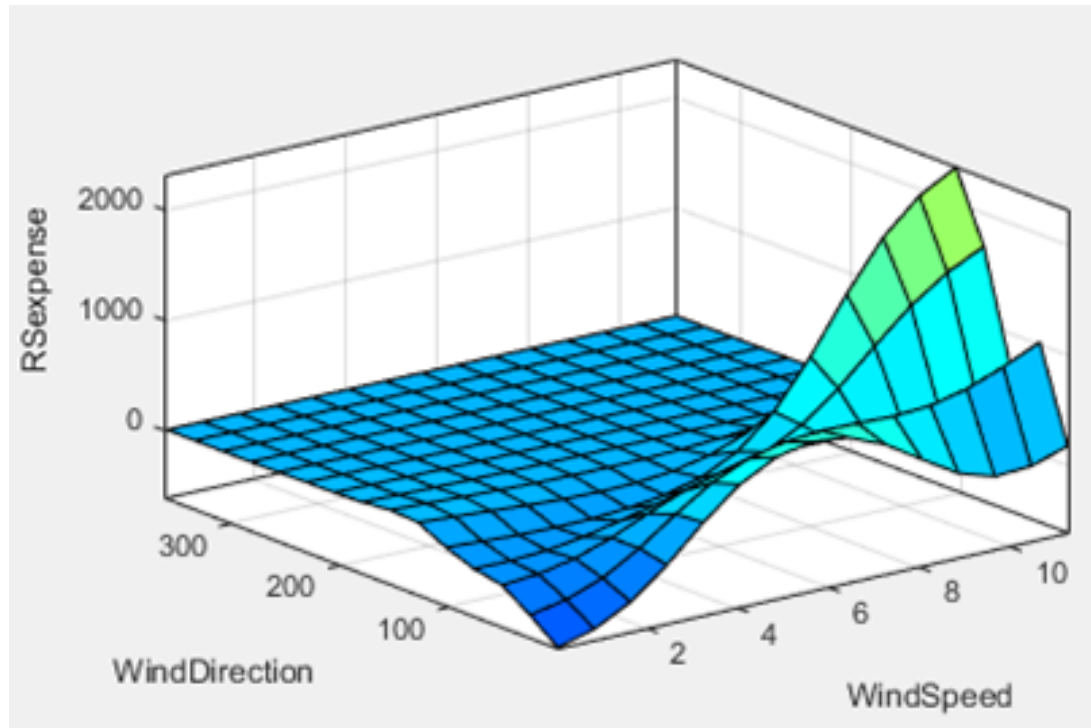


Рис. 2.10. Залежність витрат вентиляційних установок КП від швидкості та напрямку вітру

Як видно на рисунку 2.10, при зменшенні кута напрямку вітру витрати вентиляційних установок КП суттєво нелінійно залежать від швидкості вітру.

Перевірка точності роботи навченої системи нейро-нечіткого виведення на контрольній вибірці даних розміром 2517 записів показала похибку, рівну 0,43023, що приблизно дорівнює відносній похибці у 3,2%. Це свідчить про її адекватність та можливість використання на практиці для управління витратами вентиляційних установок КП [2]. Результати перевірки точності системи нейро-нечіткого виведення наведені на рисунку 2.11.

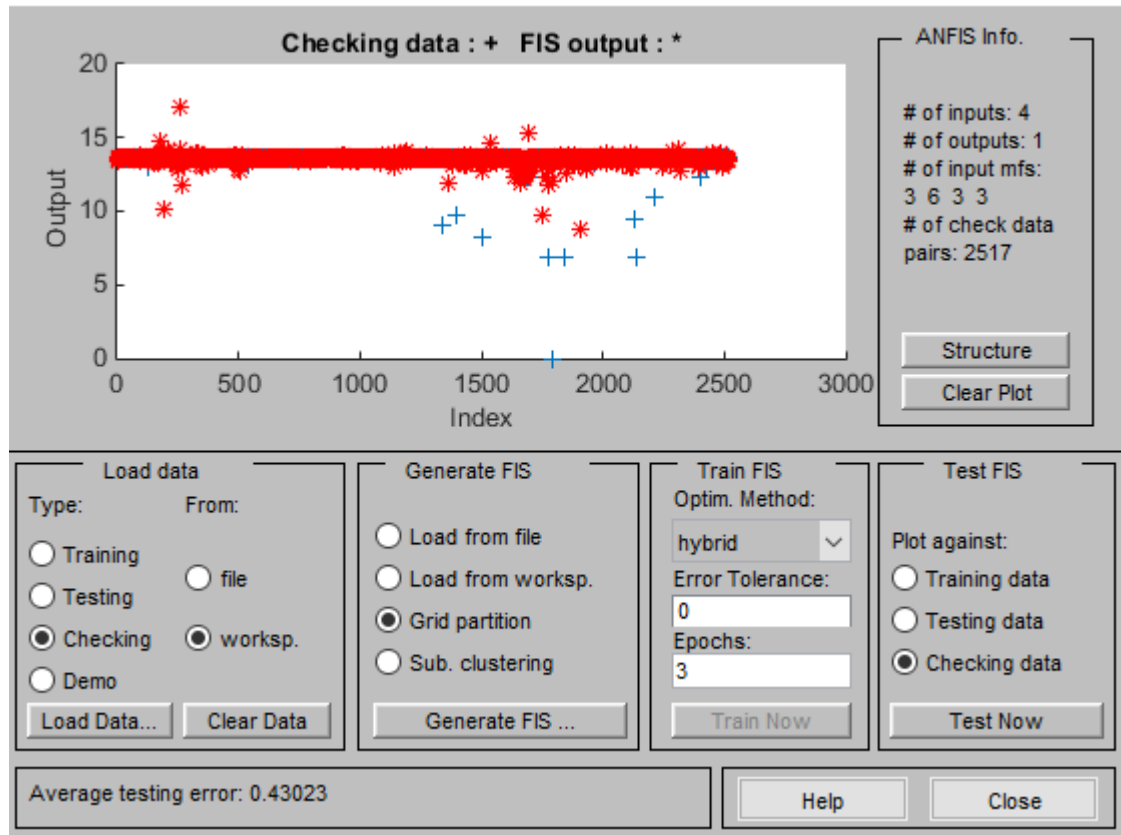


Рис. 2.11. Результати перевірки адекватності нейро-нечіткої моделі для управління витратами повітря КП

Спираючись на результати моделювання витрат повітря кільцевого простору НБК, необхідно розробити модель для управління витратами основного об'єму (ОО) НБК.

### 2.2.3 Нейро-нечітке моделювання витрат повітря вентиляційних установок основного об'єму НБК

Управління витратами повітря вентиляційних установок ОО здійснюється на основі тих же вхідних змінних, що й управління вентиляцією КП. Структура моделі управління, формалізована в редакторі ANFIS, представлена на рисунку 12.

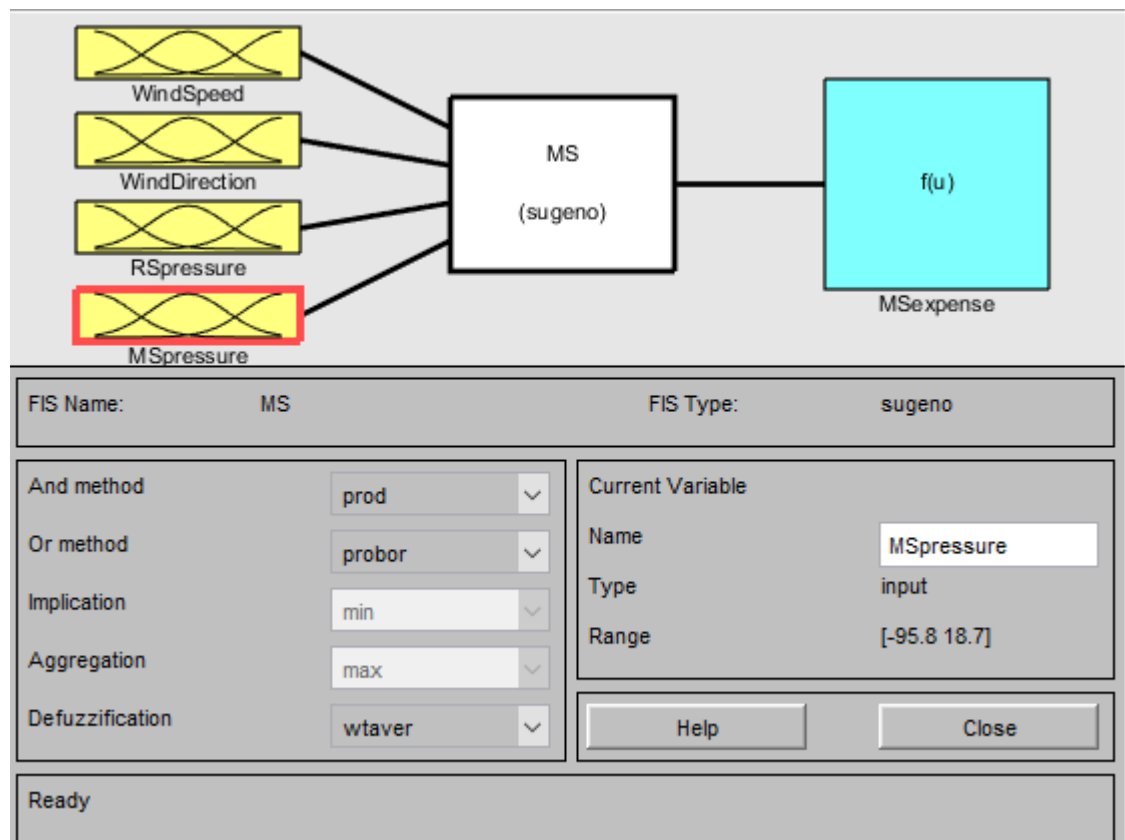


Рис. 2.12. Структура моделі управління витратами повітря ОО

Як видно на рисунку 2.12, витрати вентиляційних установок ОО, як і КП, визначаються швидкістю та напрямом вітру, перепадами тиску КП та ОО з оточуючим середовищем. Навчання нейро-нечіткої мережі було проведено на основі 25170 записів даних про значення вхідних змінних та відповідні рішення операторів щодо витрат вентиляційних установок ОО. Структури лінгвістичних змінних визначено методом підбору різних варіантів, забезпечуючи хороші показники точності при достатній швидкості навчання. Функції належності термів сформовано на основі функцій Гауса, оскільки вбудований в редактор ANFIS метод нечіткої кластеризації для цього масиву статистичних даних обрав функції саме цього типу. Загалом було виконано 15 підходів до навчання по три кроки в кожному. Результати навчання наведено на рисунку 2.13.

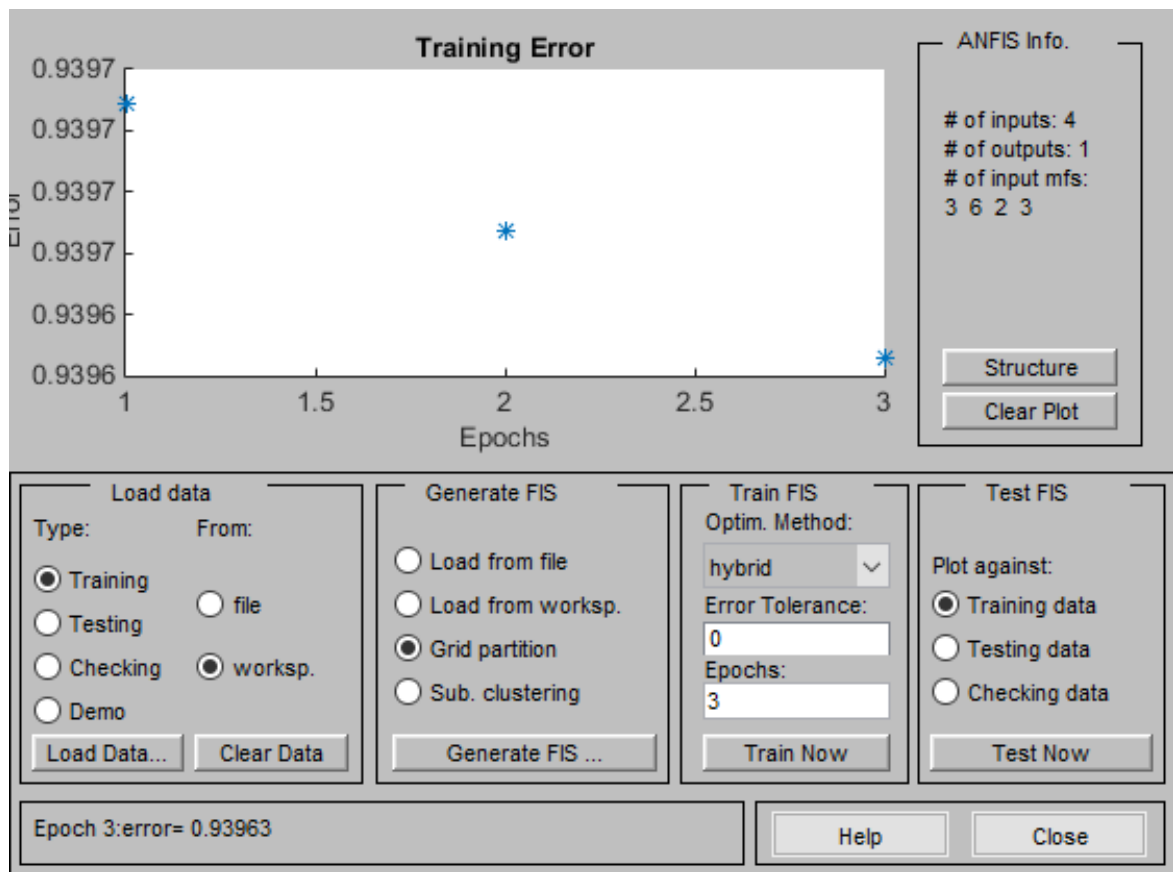


Рис. 2.13. Результати навчання нейро-нечіткої моделі для управління витратами повітря ОО

Як видно на рисунку 2.13, точність навчання склала 0,93963, що приблизно дорівнює 2,7% відносної похибки на навчальних даних. Навчання проводилося гібридним методом, який дав кращі показники точності навчання. У зв'язку з повільним покращанням точності навчання (з точністю до десятитисячного знаку), воно було зупинене після заданої кількості етапів. Похибка моделі, отримана під час навчання, задовольняє вимогам до управління процесом вентиляції ОО [2]. Сформована база знань зі 108 правил нечітких продукцій, що дозволяють розраховувати методом Такагі-Сугено витрати вентиляційних установок MS. Приклад розрахунку наведено на рисунку 2.14.

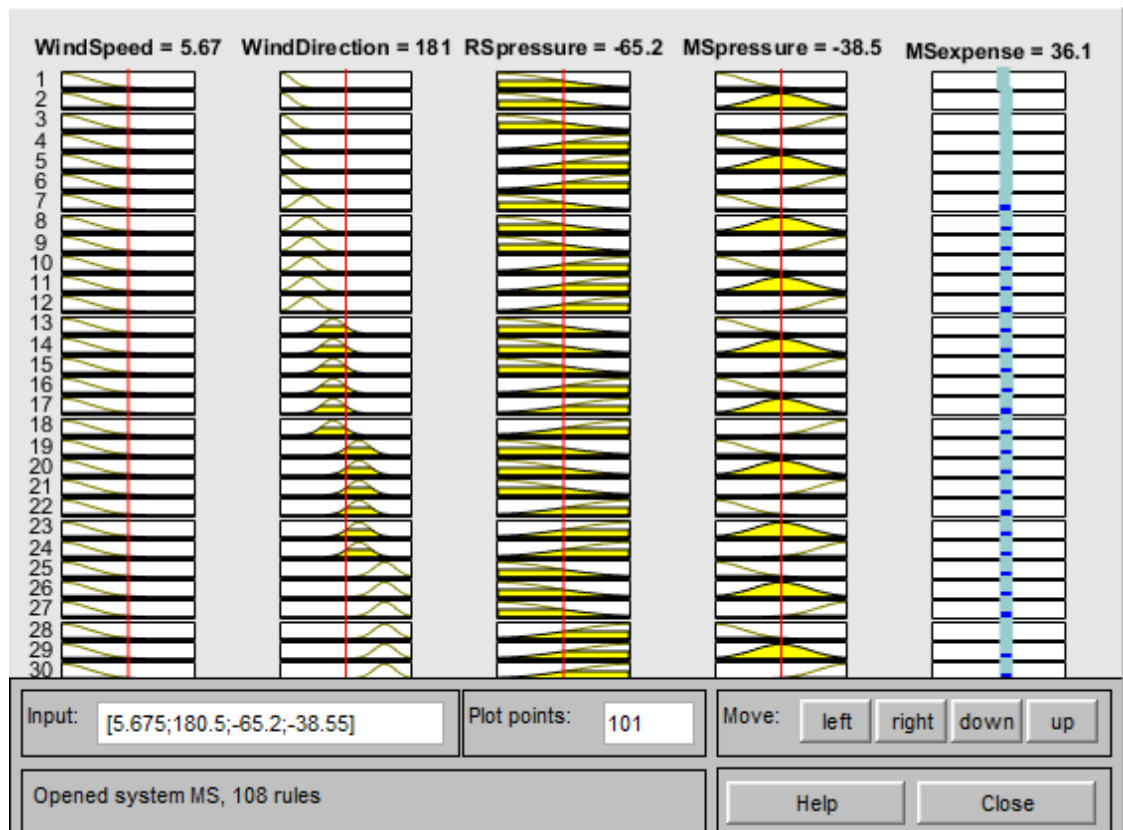


Рис. 2.14. Приклад розрахунку витрат повітря ОО на основі нейро-нечіткої моделі

Структура лінгвістичних змінних різниці тиску між кільцевим простором, основним об'ємом та навколишніми середовищем наведена на рисунках 2.15 та 2.16. Для термів лінгвістичних змінних обрано Гаусові функції належності. Їх параметри визначено відповідно до рівномірного розподілу множини значень змінної по заданій кількості термів. Відповідно до цього принципу параметри функцій розраховані редактором системи ANFIS [2]. Кількість термів визначено методом підбору, балансуючи між точністю та швидкістю навчання моделі. Слід зазначити, що збільшення кількості термів дає незначне покращання точності навчання моделі, але суттєве збільшення кількості правил підвищує складність та обсяг розрахунків, що може негативно вплинути на використання моделі.



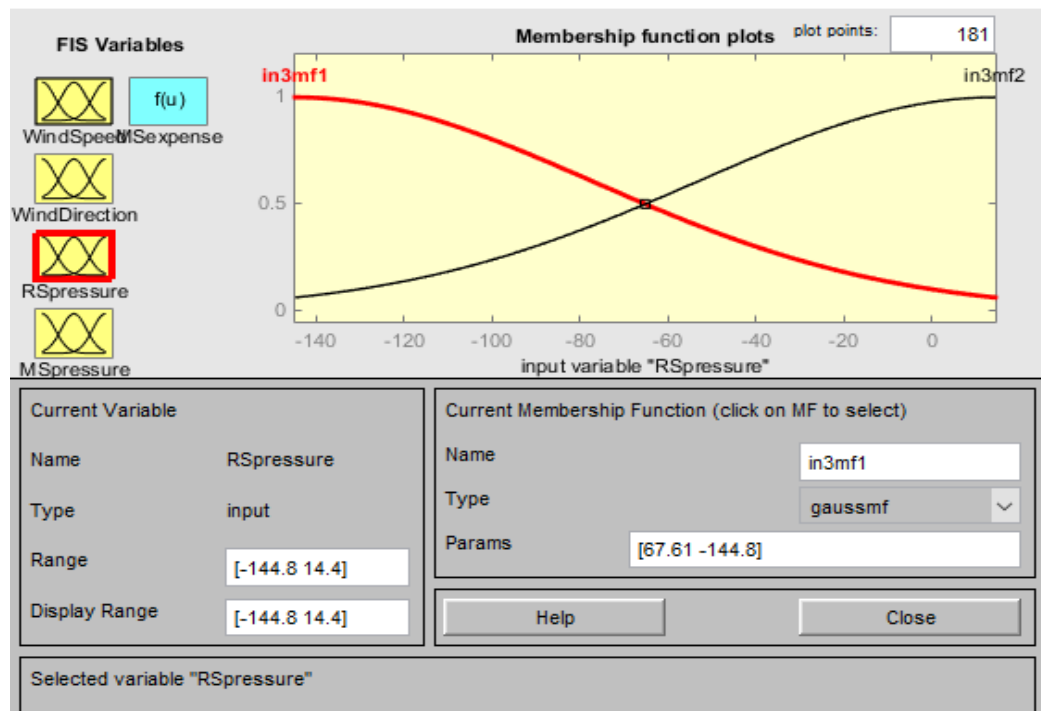


Рис. 2.15. Функції належності термів вхідної лінгвістичної змінної «Різниця тиску кільцевого простору»

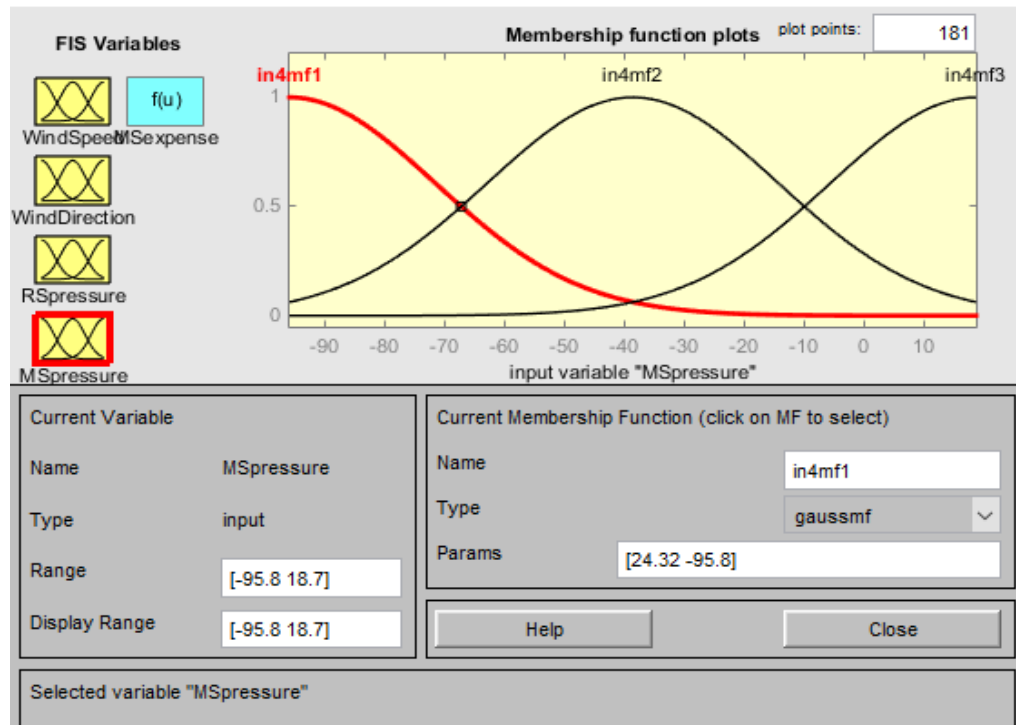


Рис. 2.16. Функції належності термів вхідної лінгвістичної змінної «Різниця тиску основного простору»

На основі масиву навчальних даних побудовано залежності витрат повітря вентиляційних установок основного об'єму НБК від напрямку та швидкості вітру, а також від різниць тиску в кільцевому просторі та основному об'ємі з навколишнім середовищем, що представлені на рисунках 2.17 та 2.18 відповідно.

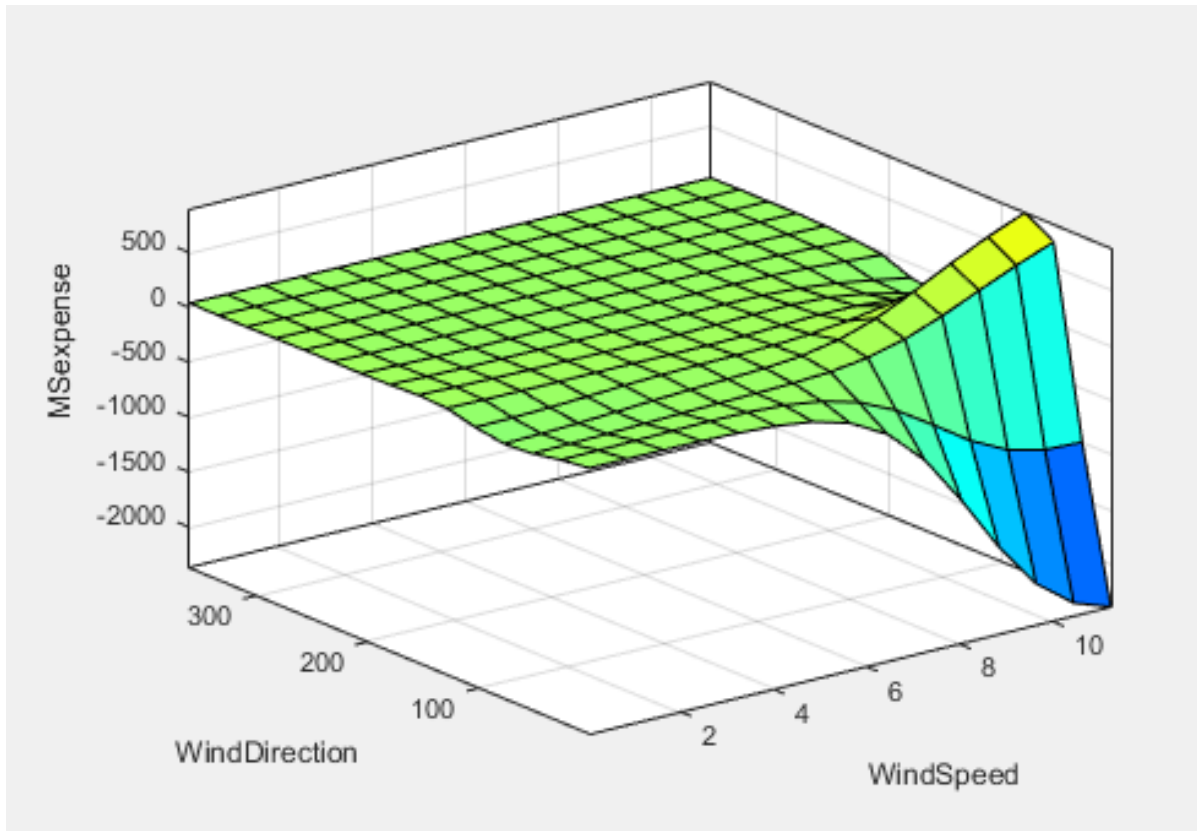


Рис. 2.17. Залежність витрат вентиляційних установок ОО від швидкості та напрямку вітру

Як видно на рисунку 2.17, витрати вентиляційних установок ОО аналогічно з КП при зменшенні кута напрямку вітру суттєво нелінійно залежать від швидкості вітру.

Аналогічно при збільшенні різниць тиску в КП чи ОО витрати повітря також нелінійно змінюються, що видно з рисунку 2.18.

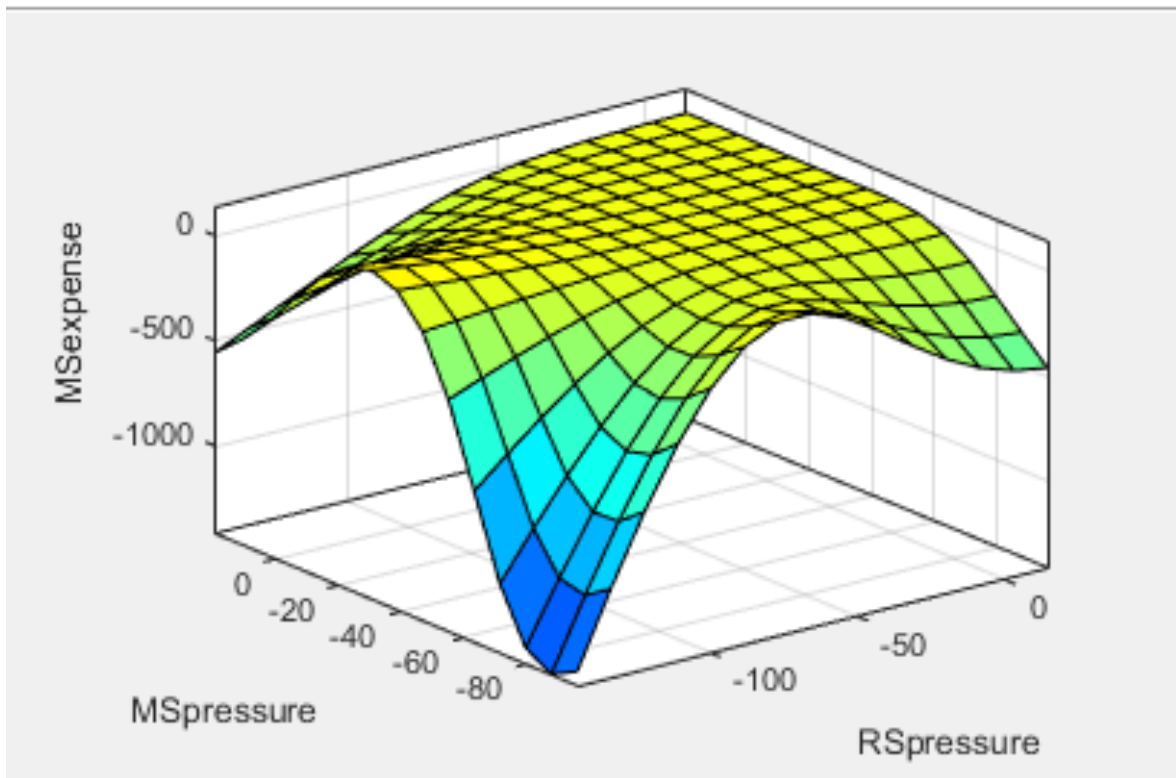


Рис. 2.18. Залежність витрат вентиляційних установок ОО від різниць тиску в КП та ОО з навколишнім середовищем

Результати перевірки адекватності моделі нейро-нечіткого логічного виведення для управління витратами вентиляційних установок MS представлені на рисунку 2.19.

Як видно на рисунку 2.19, порівняння результатів розрахунків розробленої моделі нейро-нечіткого логічного виведення з контрольним набором даних розміром 2517 записів виявило, що відхилення на однакових значеннях вхідних даних дорівнює 0,85927, яке приблизно відповідає відносній похибці у 2,5% [2]. Високі показники точності при перевірці адекватності свідчать про можливість практичного використання даної моделі для автоматизації управління витратами вентиляційних установок ОО.

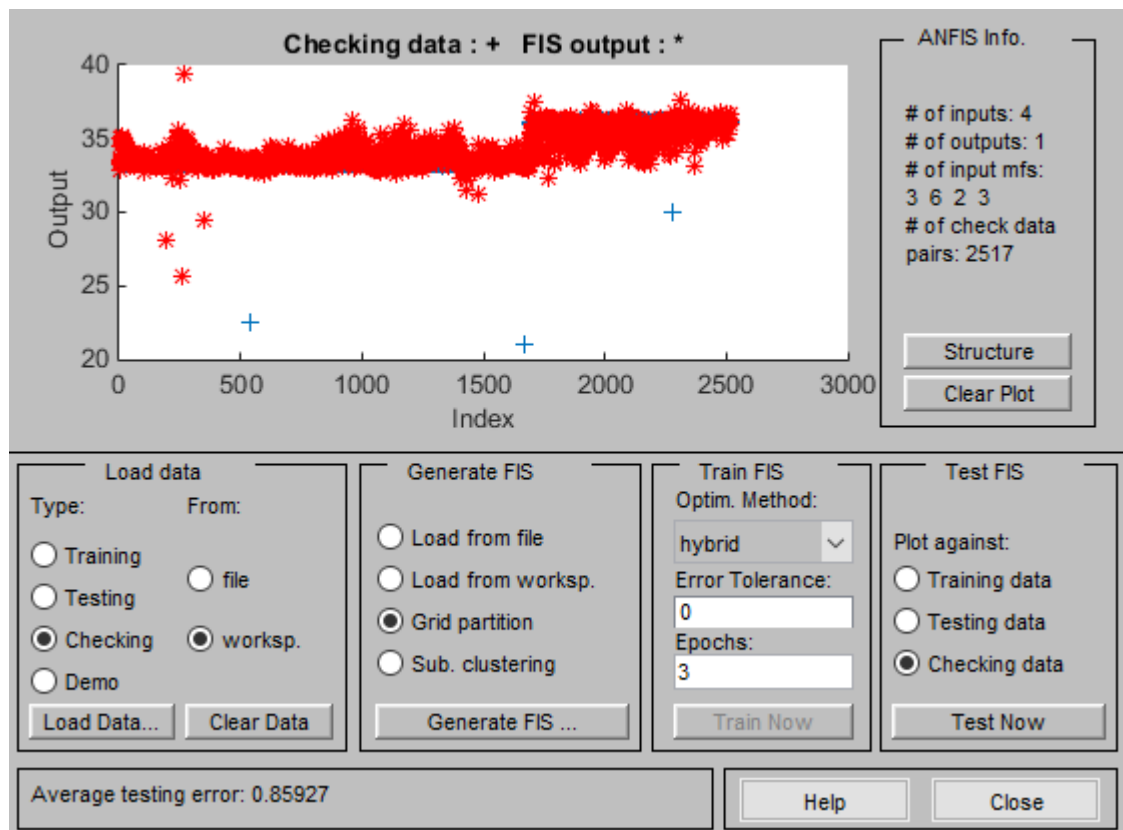


Рис. 2.19. Результати перевірки адекватності нейро-нечіткої моделі для управління витратами повітря ОО

Спираючись на розроблені та навчені нейро-нечіткі моделі логічного виведення розроблено метод управління вентиляційними установками НБК.

#### 2.2.4 Розробка методу нейро-нечіткого управління вентиляційними системами НБК

З метою автоматизації обробки даних та прийняття рішень операторами щодо значень витрат вентиляційних установок КП та ОН на основі результатів нейро-нечіткого моделювання розроблено метод управління вентиляційними системами НБК, схематично представлений на рисунку 2.20.



Рис. 2.20. Схема нейро-нечіткого управління вентиляційними системами НБК

Як видно на рисунку 2.20, на основі оброблених показників датчиків формуються значення вхідних змінних розроблених нейро-нечітких моделей

логічного виведення й на їх основі з використанням методу Такагі-Сугено розраховуються значення витрат вентиляційних установок КП та ОО. Ці рекомендовані витрати аналізуються та підтверджуються особами, що приймають рішення (ОПР). Якщо значення витрат повітря затверджено, вони передаються як завдання до системи управління НБК. Інакше ОПР визначає значення витрат повітря самостійно, після чого оцінюється необхідність перенавчання нейро-нечітких моделей. Пропонується виконувати перенавчання цих моделей, якщо відхилення між запропонованим системою та ОПР значеннями є великим або кількість відхилених рішень перевищила певний поріг. За необхідності ОПР ініціює перенавчання моделей, після чого його рішення передається до системи управління НБК.

Розроблений метод може бути застосовано при розробці цифрового двійника для автоматизації обробки даних та моделювання прийняття рішень щодо витрат вентиляційних установок НБК, оптимізація їх роботи при змінних граничних умовах [11].

## **Висновки до розділу 2**

1. Виконане детальне дослідження структури та функціональних можливостей Інтегрованої системи управління НБК. Ця система завдяки різноманітним технічним та програмним засобам дозволяє виконувати моніторинг функціонування НБК за всіма необхідними характеристиками, накопичує історичні дані, що слід врахувати при розробці архітектури цифрового двійника НБК. ІСУ НБК має обмежені можливості щодо візуалізації інформації (особливо 3D) та підтримки прийняття рішень.

2. Однією з основних підсистем НБК, функціонування якої має суттєвий вплив на радіаційну безпеку та тривалість експлуатації споруди, є вентиляційна

система. Рішення щодо обсягів витрат повітря вентиляційними установками приймаються оператором на основі поточних даних щодо стану НБК та вітрового навантаження в умовах невизначеності наявних площ протічок. Тому для автоматизації управління його вентиляцією було вирішено використати нейро-нечітке моделювання.

3. Використовуючи адаптивну систему нейро-нечіткого виводу ANFIS, на основі статистичних даних щодо функціонування НБК розроблені нейро-нечіткі моделі, які дозволяють методом Такагі-Сугено розрахувати витрати його вентиляційних установок. Перевірка запропонованих підходів на контрольній вибірці даних показала достатньо високу точність розрахунків, що підтверджує можливість їх практичного використання при прийнятті рішень щодо управління вентиляцією НБК.

4. Спираючись на розроблені та навчені нейро-нечіткі моделі розроблено метод управління вентиляційними установками НБК. Метод передбачає обробку даних щодо вітрового навантаження та тисків в зонах НБК і розрахунок витрат повітря вентиляційних установок за допомогою нейро-нечітких моделей та затвердження чи коригування їх особами, що приймають рішення, що дозволяє автоматизувати процес управління вентиляційними установками та скоротити витрати повітря з радіоактивними аерозолями в навколишнє середовище. Отримані наукові результати можуть бути використані при розробці цифрового двійника НБК.

## **РОЗДІЛ 3**

### **РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ТА МОДЕЛЕЙ СТРУКТУР ДАНИХ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА НБК**

Як було показано в підрозділі 2.1, існуюча Інтегрована система управління достатньо повно реалізує моніторинг поточного стану НБК та управління його процесами, однак має обмежені можливості в частині візуалізації інформації, прогнозування стану НБК та підтримки прийняття рішень. Наприклад, накопичені з датчиків дані у системі не мають прив'язки до просторових координат НБК, що не дозволяє здійснювати 3D візуалізацію інформації. Для подолання зазначених недоліків доцільно застосувати технологію цифрових двійників. Спираючись на моделювання процесів НБК в розділі 2 та використовуючи результати огляду в розділі 1 підходів до створення цифрових двійників, в даному розділі виконується проектування архітектури та структур даних цифрового двійника НБК. Сформовано вимоги до цифрового двійника НБК з використанням діаграми прецедентів UML, розроблено його багаторівневу архітектуру та моделі бази даних та знань.

#### **3.1 Формування вимог до цифрового двійника**

Метою розробки цифрового двійника є забезпечення ефективного вирішення задач візуалізації інформації, моніторингу та прогнозування стану НБК ЧАЕС і прийняття рішень щодо управління ним. Як було зазначено в розділі 1, у загальному випадку цифровим двійником називають віртуальний прототип деякого фізичного об'єкта чи процесу, який виконує збір та використання цифрової інформації. Цифровий двійник складається з двох частин: візуальної моделі об'єкта управління та поведінкової моделі, яка включає відповідні



математичні моделі та моделі даних. За своїм призначенням цифрові двійники поділяються на цифрові двійники-прототипи (digital twin prototype), цифрові двійники-екземпляри (digital twin instance) та цифрові двійники-агрегати (digital twin aggregate), що поєднують кілька цифрових двійників-екземплярів. За характером зв'язку між цифровим двійником та реальним об'єктом вони поділяються на цифрову модель (автоматизований обмін даними не виконується), цифрову тінь (лише отримують дані з об'єкту) та, власне, цифровий двійник (наявний двонаправлений обмін даними між двійником та об'єктом) [10]. На нашу думку, найбільш ефективним типом для моніторингу та управління НБК є цифровий двійник з двонаправленим обміном даними [4].

Виходячи з мети розробки цифрового двійника та враховуючи специфіку об'єкту автоматизації, можна сформулювати основні вимоги до його побудови, які діляться на нефункціональні та функціональні.

Нефункціональні вимоги накладають загальні обмеження та характеризують специфіку програмного продукту цифрового двійника НБК.

Інформація, яка буде збиратися та оброблятися цифровим двійником, має закритий характер, що формує обмеження на використання різноманітних хмарних сервісів для її обробки, зберігання та аналізу. Вся інформація має зберігатися на локальних обчислювальних потужностях ЧАЕС з необхідним дублюванням та резервним копіюванням, з можливостями захищеного віддаленого доступу для перегляду аналітичної інформації. Доступ до інформації та функціональних можливостей програмної системи цифрового двійника має налаштовуватися та обмежуватися для різних ролей користувачів.

Беручи до уваги високу складність об'єкту автоматизації, для врахування ризиків проекту розробка та впровадження цифрового двійника має відбуватися на основі моделі еволюційного життєвого циклу, використовуючи переваги мікросервісної архітектури для реалізації функціональних модулів системи. Враховуючи тривалий плановий термін експлуатації НБК та відповідно його

цифрового двійника, програмні засоби реалізації цифрового двійника мають забезпечувати можливості його супроводу, розвитку та доповнення новими функціональними модулями. Інтерфейс програмних модулів має надавати всю необхідну інформацію, бути ергономічним та забезпечувати виконання підготовленим та навченим персоналом поставлених перед ним задач. Помилкові дії користувачів не повинні приводити до порушення стабільності функціонування цифрового двійника.

Продуктивність цифрового двійника не повинна суттєво погіршуватися при зростанні кількості його користувачів, програмне забезпечення має працювати стабільно.

Враховуючи використання на НБК наявної Інтегрованої системи управління, модулі цифрового двійника мають мати можливості обміну інформацією з ІСУ. Протоколи та технічні засоби передачі даних мають бути надійними, забезпечувати гарантовану швидку та повну передачу інформації зі збереженням її логічного порядку. Також потрібно врахувати, що архітектура ІСУ передбачає лише читання її інформації, а передача даних до ІСУ можлива тільки шляхом введення її операторами з протоколюванням виконаних дій.

Швидкість виконання операцій в цифровому двійнику має відповідати потребам технологічних процесів, в яких використовуються зазначені операції. Відповідно, для процесів аналізу та прийняття рішень швидкість виконання функцій цифрового двійника має бути достатньо висока, щоб вони виконувалися в режимі реального часу, а, наприклад, в процесах навчання нейро-нечітких моделей або ідентифікації параметрів моделей час операцій обмежується періодом можливого очікування використання цих результатів.

Структури даних та знань цифрового двійника мають зберігати поточну та історичну інформацію про його стан, підсистеми та технічні пристрої, моделі, алгоритми, прийняті рішення, результати прогнозу та аналізу. Доступ до інформації в базі даних та знань має бути обмежено для різних операцій та

користувачів. Швидкість виконання СУБД запитів до інформації має бути достатньою для здійснення операцій в режимі реального часу. Зростання обсягів інформації, що зберігається, не повинно суттєво впливати на швидкість її обробки модулями цифрового двійника.

Функціональні вимоги до цифрового двійника НБК представлені у вигляді діаграми варіантів використання (прецедентів) UML, що наведена на рисунку 3.1.

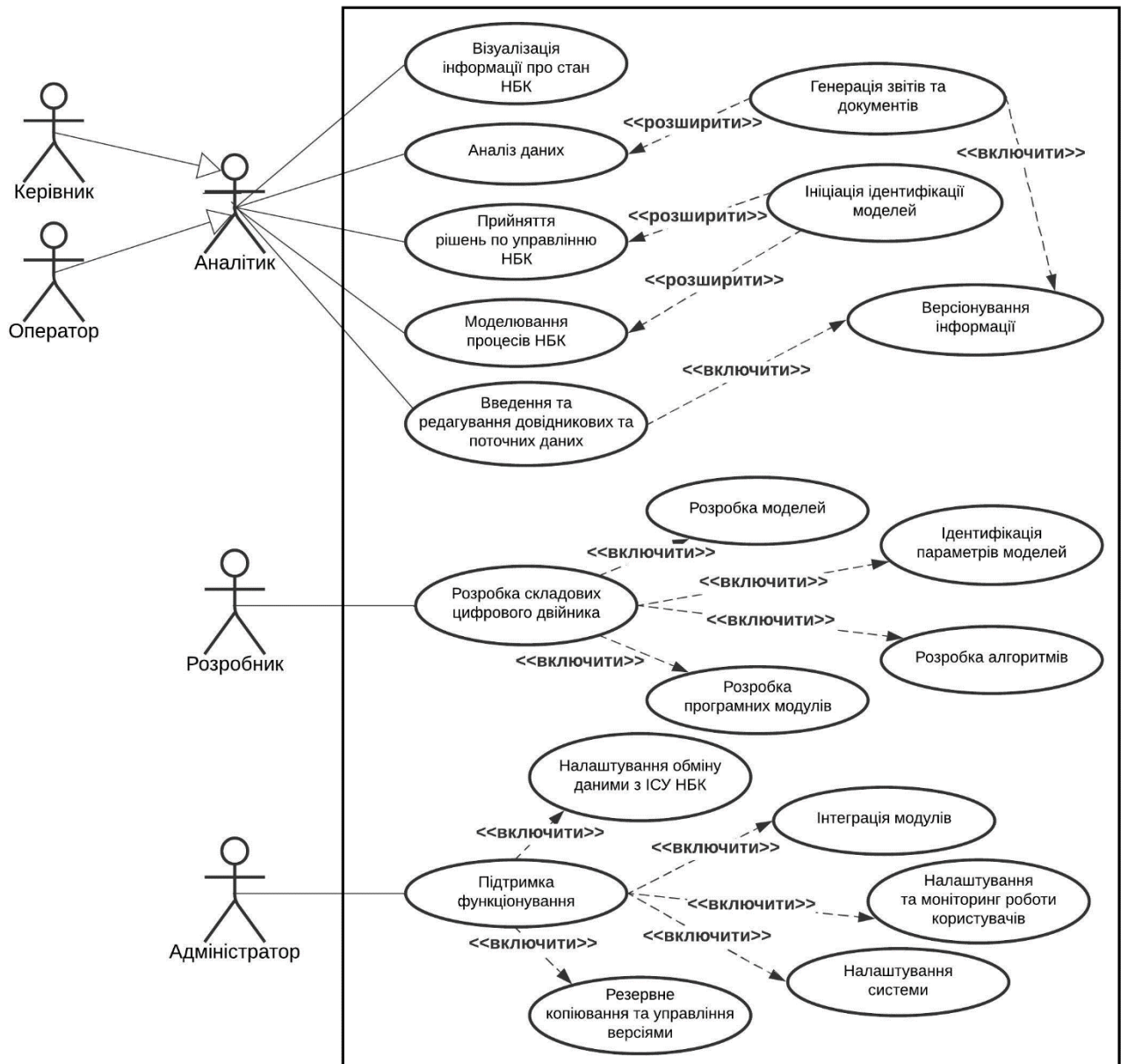


Рис. 3.1. Діаграма варіантів використання цифрового двійника НБК

Як видно на рисунку 3.1, основними ролями користувачів, що будуть взаємодіяти з цифровим двійником, є адміністратор, розробник та аналітик, який є узагальненням для ролей оператора та керівника [2,9]. Виконавцями зазначених ролей будуть в основному співробітники ЧАЕС, організаційна структура якої наведена на рисунку 3.2.

Відповідно до рисунку 3.2, основними користувачами цифрового двійника НБК будуть співробітники ЧАЕС, що знаходяться в підпорядкуванні її технічного директора. В ролі операторів будуть, як правило, виступати співробітники цеху експлуатації ОУ та НБК, а також цехів теплової автоматики та вимірювань, радіаційної безпеки, поводження з радіоактивними відходами, електричного цеху та відділу інтегрованого поводження з радіоактивними матеріалами. За виробничої необхідності доступ до цифрового двійника можуть мати група оперативного управління, інженерний центр, будівельний відділ, відділи технічного контролю та головного метролога. До керівників, відповідно діаграми варіантів використання, відносяться сам технічний директор, його заступники з експлуатації, з поводження з радіоактивними відходами, з інфраструктури, з безпеки, начальник цеху експлуатації ОУ та НБК, начальник зміни НБК, за виробничої необхідності керівники інших цехів та відділів в підпорядкуванні технічного директора ЧАЕС.

Співробітники навчально-тренувального центру можуть використовувати копію цифрового двійника НБК з історичними чи навчальними даними для здійснення підготовки нових співробітників ЧАЕС чи проведення тренувань вже діючого персоналу з метою моделювання та відпрацювання навичок дій в різних виробничих ситуаціях.

До основних функцій ролі аналітика, відповідно до рисунку 3.1, входять візуалізація інформації про стан НБК, аналіз даних, прийняття рішень з управління по управлінню НБК, моделювання його процесів та введення довідникових даних і даних, введення яких не може бути автоматизоване [2,9].

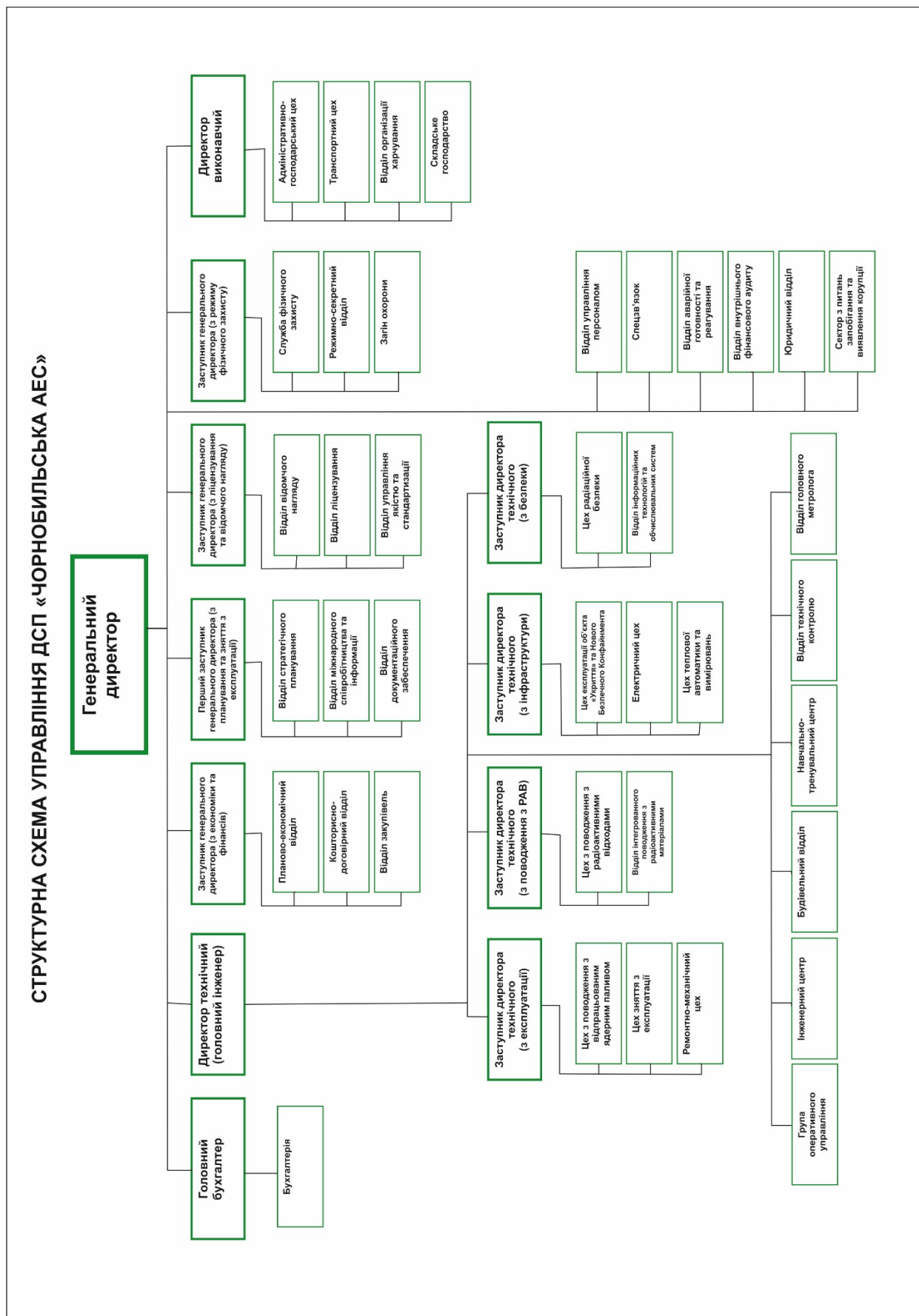


Рис. 3.2. Організаційна структура ЧАЕС [116]

Візуалізація інформації про поточний стан НБК передбачає можливість 3D відображення даних щодо значень вимірних величин (поточних чи історичних) з прив'язкою до координат споруди, з кольоровим забарвленням відповідно до заданих налаштувань стосовно рівня значення. Наприклад, зелений колір – показники в межах норми, жовтий колір – показники знаходяться в нормі, але вже поруч з граничними значеннями, червоний колір – вихід за допустимі межі. Програмне забезпечення цифрового двійника НБК повинно дозволяти показувати значення заданої налаштуваннями певної підмножини величин, здійснювати масштабування та повороти зображення, деталізацію даних при наведенні на певну точку зображення.

Під функцією аналізу даних розуміється можливість побудови різноманітних звітів на основі технології OLAP з використанням спеціалізованого сховища даних, що буде містити підготовлені для аналізу дані з бази даних цифрового двійника. Крім того, потрібна можливість на основі аналізу даних формувати певний набір документів відповідно до діючої на підприємстві системи документації, причому щодо сформованих документів повинен вестися облік версій з можливістю переглянути попередні версії та співробітників, які їх створювали. Сформовані документи при необхідності мають відправлятися в електронному вигляді на задані в налаштуваннях електронні адреси. В подальшій перспективі було б корисним реалізувати в межах аналізу даних операції кластеризації, класифікації, прогнозу за регресією, побудови асоціативних правил з метою більш глибокого дослідження наявних даних, виявлення нових закономірностей в процесах НБК та покращання прийняття рішень, а також для розширення та удосконалення моделей та алгоритмів цифрового двійника.

Забезпечення функції підтримки прийняття рішень по управлінню НБК повинно передбачати рекомендацію системою оптимального чи близького до оптимального вирішення деякої задачі управління процесами НБК, щодо якої кінцеве рішення виробляється особою, що приймає рішення (ОПР). Перелік

таких задач може бути затверджений під час розробки програмного забезпечення цифрового двійника та змінюватися в ході його функціонування, що має бути забезпечено за рахунок побудови його відповідної архітектури. Запропоноване системою рішення розглядається та затверджується ОПР, після чого передається до виконання. Якщо ОПР вважає за необхідне, вона може внести зміни до запропонованого системою рішення. В такому випадку система має надати оцінку зміненому рішенні й ознайомити з ним ОПР, яка може знову змінити це рішення. Після остаточного підтвердження ОПР рішення воно передається до виконання. В інформаційній системі необхідно вести історію прийнятих співробітниками рішень та їх оцінок з можливістю її перегляду користувачами з роллю керівника. Функція моделювання процесів в цифровому двійнику передбачає можливість на основі системи моделей подивитися та оцінити стан НБК в той чи інший момент часу на основі певного набору вхідних даних, реалізовувати різні сценарії по схемі «якщо – то». Множина процесів та відповідних моделей повинні налаштовуватися з метою масштабування та постійного удосконалення моделювання НБК, що особливо важливо, беручи до уваги його запланований термін використання у 100 років. Потрібна можливість зберігати дані моделювання з метою їх використання при прийнятті рішень з управління НБК. Крім того, можливість зберігати різні варіанти моделювання процесів буде корисною при організації навчання співробітників НБК та відпрацюванні різних виробничих ситуацій замість проведення натурних експериментів на самому об'єкті.

Під час моделювання та прийнятті рішень користувачі системи в ролі аналітика можуть помітити, що через якісь причини система видає інформацію, яка не є адекватною. В такому разі користувач повинен мати можливість ініціювати повторну ідентифікацію відповідної моделі чи моделей. Під ідентифікацією моделі тут розуміється ідентифікація в широкому розумінні, що включає в себе розробку чи модифікацію певної модельної структури, що описує

клас однотипних об'єктів, та пошук значень параметрів, які характеризують конкретний об'єкт [116]. Навчання та перенавчання моделей AI, що можуть бути використані для моделювання процесів НБК, в роботі розглядається як один з випадків ідентифікації моделей. Після ініціації ідентифікації моделі вона має перейти до тестового стану, а користувачі з роллю розробника мають отримати інформацію про необхідність почати роботу над аналізом та можливими змінами цієї моделі.

Також користувачі з загальною роллю аналітика повинні мати можливість виконувати введення певної довідкової інформації, необхідної для використання цифрового двійника, а також здійснювати введення даних, які на поточний момент неможливо автоматизовано ввести шляхом обробки результатів вимірювань з датчиків або передачею інформації з інших підсистем. Необхідно реалізувати версіонування важливих для функціонування цифрового двійника даних, що введені користувачами, з можливістю перегляду попередніх значень цих величин та даних про користувачів, що їх змінили.

Функціонування цифрового двійника має ґрунтуватися на використанні бібліотеки моделей процесів НБК та алгоритмів обробки його даних та прийняття рішень. Як вже зазначалося, термін планової експлуатації НБК становить 100 років, тому його цифровий двійник повинен мати можливості для розвитку та удосконалення. Відповідно, серед користувачів цифрового двійника НБК передбачено роль розробника, для якої мають бути доступні функції створення моделей та ідентифікації їх параметрів, розробки алгоритмів та програмних модулів [2, 9]. Безумовно, в межах першої стадії розробки цифрового двійника зазначені компоненти можуть й мабуть повинні розроблятися за допомогою сторонніх засобів. Однак в подальшому з метою уніфікації та полегшення підтримки функціонування цифрового двійника ці засоби по можливості мають інтегруватися в його структуру. Потрібно сформулювати шаблони моделей процесів та об'єктів НБК з можливістю їх використання розробниками, в тому числі



запропонувати певну графічну нотацію для формування з шаблонів деяких типових елементів структури нової моделі. Параметри моделі повинні знаходитися шляхом застосування відповідних методів параметричної ідентифікації для заданого критерію, що передбачає створення бібліотеки відповідних алгоритмів та шаблонів критеріїв. В тому числі повинні бути реалізовані необхідні алгоритми машинного навчання та моделі штучного інтелекту. Моделі та алгоритми повинні інтегруватися в програмні модулі з розширенням потрібних структур даних, для додавання яких в цифровий двійник мають бути реалізовані необхідні архітектурі рішення. Реалізація зазначених функцій дозволить своєчасно розвивати можливості цифрового двійника, ґрунтуючись на певних стандартах та засобах розробки. Виконувати функції розробника цифрового двійника мають спеціально підготовлені співробітники відділу інформаційних технологій та обчислювальних систем ЧАЕС або сторонні виконавці.

Підтримка функціонування цифрового двійника НБК має здійснюватися користувачами з роллю адміністратора. Прогнозується, що адміністраторами цифрового двійника будуть працівники відділу інформаційних технологій та обчислювальних систем ЧАЕС. Зазначені працівники повинні здійснювати налаштування обміну даними модулів цифрового двійника з існуючою ІСУ НБК та за необхідності з зовнішніми системами, інтегрувати програмні модулі цифрового двійника в цілісну систему, виконувати налаштування роботи користувачів системи, здійснювати розподіл на основі затверджених керівництвом правил їх прав доступу та проводити моніторинг їх роботи, здійснювати загальні налаштування роботи цифрового двійника, забезпечувати резервне копіювання даних й програмного коду, контролювати та управляти версіями модулів цифрового двійника.

Сформовані вимоги до цифрового двійника НБК мають бути покладені в основу розробки його архітектури [1].

### 3.2 Розробка архітектури цифрового двійника

Спираючись на сформовані в підрозділі 3.1 вимоги, розроблена узагальнена архітектура цифрового двійника НБК, представлена на рисунку 3.3 [1,4].

Як видно на рисунку 3.3, запропонована архітектура цифрового двійника НБК містить п'ять рівнів [6]. Виходячи з наявного рівня автоматизації контролю процесів НБК, ІСУ НБК має входити як система нижнього рівня до його цифрового двійника. Тому на першому, нижньому рівні виконується базове управління технологічними процесами НБК за допомогою існуючої Інтегрованої системи управління. Система відповідальна за збір та накопичення первинних даних щодо функціонування НБК, контроль та управління його поточним станом з використанням датчиків, програмованих логічних контролерів та ін. Враховуючи, що в ІСУ НБК вже реалізовано збір та первинну обробку даних, структури даних цифрового двійника мають бути інтегровані з ІСУ для їх отримання, а також мають містити інформацію щодо результатів моделювання, прогнозування та прийнятих рішень.

Для передачі з бази даних ІСУ інформації, необхідної для аналізу, прогнозування та прийняття рішень, пропонується на другому рівні реалізувати сервер комунікації, API якого забезпечать формування необхідних вибірок даних. Наразі архітектура ІСУ НБК не передбачає отримання керуючих команд з інших систем, тому передачу для виконання прийнятих на верхніх рівнях цифрового двійника рішень здійснюють користувачі за допомогою наявного інтерфейсу в ІСУ НБК. Програмне забезпечення серверу комунікації має виконувати зчитування інформації зі структур даних ІСУ відповідно до запитів цифрового двійника з заданою періодичністю та формувати пакети даних й передавати їх до бази даних та знань цифрового двійника. В залежності від вибору СУБД для цифрового двійника та фізичного розташування даних архітектура серверу комунікацій підлягає уточненню на етапі реалізації [4,6].

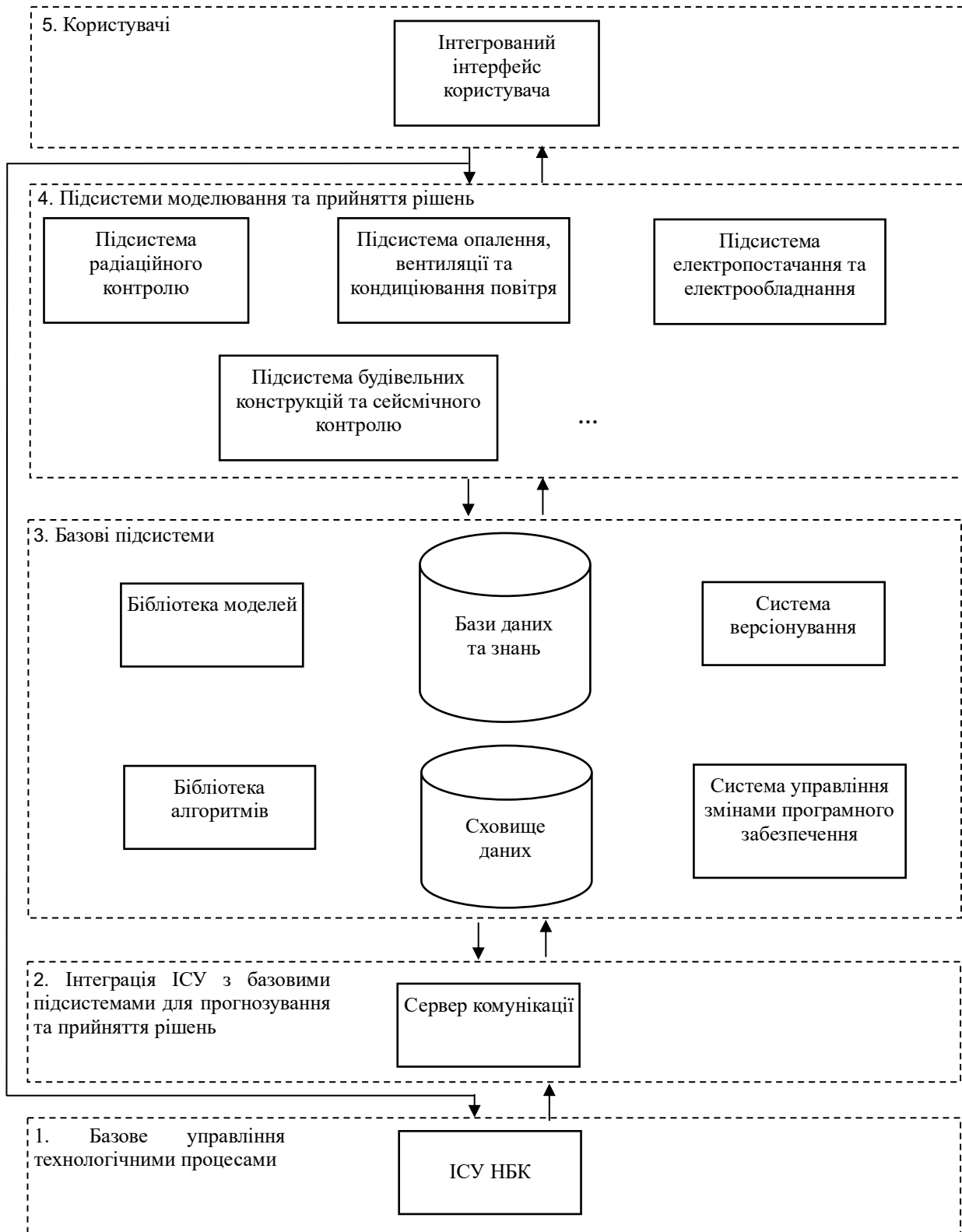


Рис. 3.3. Узагальнена архітектура цифрового двійника НБК ЧАЕС

Основу функціонування цифрового двійника складають базові підсистеми, представлені на третьому рівні: бібліотека моделей, бібліотека алгоритмів, бази даних та знань, сховище даних, система версіонування та система управління змінами програмного забезпечення [1].

Бібліотека моделей цифрового двійника має містити комп'ютерні моделі мікро-рівня явищ та об'єктів НБК, засоби ідентифікації їх параметрів та оцінки адекватності. Ці моделі використовуються як складові моделей макро-рівня для прогнозу та прийняття рішень щодо певних аспектів функціонування НБК, що представлені на четвертому рівні [4].

Проведені дослідження свідчать, що бібліотека моделей цифрового двійника НБК має включати:

- цифрову геометричну модель об'єкта;
- цифрову геометричну модель ОУ;
- цифрову геометричну модель високоактивних відходів (ВAB);
- цифрову модель розповсюдження радіоактивних відходів (РАВ);
- цифрову модель роботи вентиляційних установок;
- цифровий набір розрахункових даних деталей, елементів й вузлів НБК, в тому числі інформацію про технологічні процеси виготовлення та складання окремих елементів;
- цифрові моделі інших фізичних та хімічних процесів.

Бібліотека моделей має розвиватися та удосконалюватися по мірі поглиблення знань щодо процесів НБК, розробки нових підходів до моделювання, в тому числі за рахунок розвитку моделей AI. Враховуючи мету та задачі розробки цифрового двійника, можна сформулювати основні взаємопов'язані кластери його моделей, які схематично представлені на рисунку 3.4. Моделі процесів та об'єктів НБК, що в подальшому будуть розроблятися, будуть включатися до відповідного кластеру.



Рис.3.4. Кластерна структура моделей цифрового двійника НБК

Одним з головних завдань побудови цифрового двійника НБК є покращання можливостей візуалізації інформації щодо його стану, тому моделі просторово-об'ємного кластеру є одними з основних. На рисунку 3.5 показана структура цього кластеру.

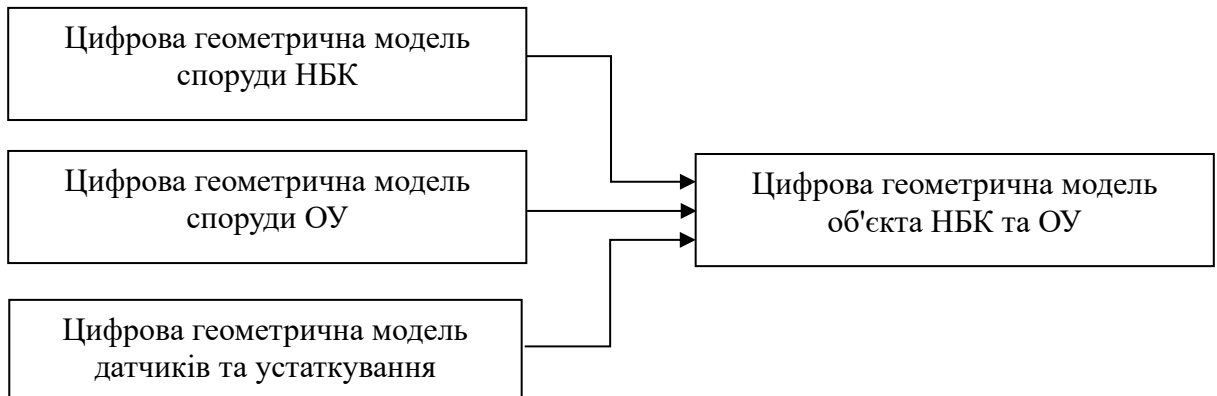


Рис. 3.5. Структура моделей просторово-об'ємного кластеру

Як видно на рисунку 3.5, до просторово-об'ємних моделей цифрового двійника входять геометрична модель споруди НБК, ОУ, датчиків та устаткування. Зазначені моделі мають бути виконані з використанням технології 3D для відображення характеристик зазначених об'єктів в трьох вимірах по заданій сітці декартових координат, а також з використанням кольорового виділення об'єктів. Ці моделі можуть бути використані як основа для відображення поточного чи історичного стану НБК, за рахунок обертання та масштабування вони дозволять наглядно моделювати його характеристики.

Бібліотека алгоритмів має забезпечувати обробку даних, їх інтелектуальний аналіз та прийняття рішень. Відповідно до зазначених в підрозділі 3.1 вимог, до неї можуть входити різноманітні алгоритми чисельних методів та методів оптимізації, методів параметричної ідентифікації моделей та алгоритми машинного навчання, нечіткого логічного виведення та інші алгоритми інтелектуальної обробки даних та AI [4].

Бази даних та знань призначені для зберігання інформації щодо результатів прогнозування та прийняття рішень, нечітких продукційних правил та інших компонентів для інтелектуального аналізу інформації. Їх структура визначається при вирішенні конкретних завдань з аналізу та управління НБК [1]. В тому числі структури даних та знань мають забезпечувати використання методу нейро-нечіткого управління вентиляційними установками НБК, розробленого в підрозділі 2.2 даної роботи.

Сховище даних призначене для зберігання оброблених, уніфікованих та підготовлених до аналізу даних, які складаються як з інформації баз даних поточного рівня ієрархії, так і з даних, отриманих від ІСУ НБК. Їого структури мають бути сформовані на основі вимог технології OLAP для аналізу даних, передбачати формування необхідних звітів та документів на основі запроваджених на ЧАЕС правил системи документації [4,6].

Система версіонування призначена для відстеження змін в ключових даних та параметрах моделей, зберігання історії результатів прогнозів, прийнятих рішень, сформованих електронних документів тощо. Інформація, що зберігається, має дозволяти відновити початковий стан даних та відслідковувати користувачів, які вносили зміни. Для запобігання вичерпання вільного дискового простору технічних обчислювальних ресурсів цифрового двійника через накопичення версій інформації необхідно реалізувати її архівування через певний час зберігання та перенос на зовнішні носії.

Система управління змінами програмного забезпечення має давати можливість керування проектами модифікацій цифрового двійника, автоматизації тестування, контролю інтеграції та розгортання. На наступних етапах розвитку цифрового двійника пропонується включити до її складу засоби розробки моделей та їх ідентифікації, розробки програмних модулів [4].

Наведені базові підсистеми використовуються в роботі підсистем моделювання та прийняття рішень, представлених на четвертому рівні архітектури цифрового двійника.

До підсистем моделювання та прийняття рішень цифрового двійника НБК в роботі пропонується включити [6]:

- підсистему радіаційного контролю;
- підсистему опалення, вентиляції та кондиціонування повітря;
- підсистему електропостачання та електрообладнання;
- підсистему будівельних конструкцій та сейсмічного контролю.

Набір цих підсистем може бути розширено виходячи з вимог до вирішення задач управління НБК та вимог щодо забезпечення радіаційної безпеки.

Підсистеми моделювання та прийняття рішень в загальному випадку можуть мати модульну структуру, до складу якої входять модулі [1,4,6]:

- візуалізації поточного та прогнозного стану;
- аналізу та формування звітності;

- класифікації та прогнозу стану НБК;
- формування рекомендацій та оцінки прийнятих рішень;
- погодження прийнятих рішень в ієрархічній структурі управління та моніторингу їх виконання.

Перелік зазначених модулів може бути змінено та розширено в залежності від специфіки підсистеми.

Реалізацію модулів підсистем моделювання та прийняття рішень, інших складових цифрового двійника рекомендується здійснювати на основі архітектури мікросервісів з використанням захищених протоколів обміну даними між ними. З метою підвищення рівня кібербезпеки для передачі даних щодо функціонування цифрового двійника НБК ЧАЕС слід використовувати закриту локальну інформаційну мережу.

На верхньому рівні цифрового двійника знаходиться інтегрований інтерфейс користувача, що має забезпечувати роботу з підсистемами в залежності від налаштувань прав доступу користувачів. Сформовані на основі аналізу та моделювання рішення користувачі переносять до ІСУ НБК з метою реалізації за допомогою її програмних та технічних засобів [1,4].

Таким чином, розроблена архітектура цифрового двійника НБК повністю відповідає сформованим у підрозділі 3.1 функціональним та нефункціональним вимогам. Вона побудована на основі модульного принципу та має багаторівневу структуру, що дозволяє врахувати особливості функціонування об'єкту автоматизації та використати можливості наявних інформаційних систем і засобів автоматизації для вирішення задач візуалізації інформації, аналізу, моделювання та підтримки прийняття рішень.

Одне з центральних місць в архітектурі цифрового двійника НБК займають його бази даних та знань, структури яких для зберігання інформації необхідно розробити.



### 3.3 Розробка моделі бази даних та знань цифрового двійника

База даних та знань цифрового двійника має забезпечувати зберігання інформації, необхідної для функціонування всіх його підсистем та містити результати їх роботи. Для розробки її моделі необхідно формалізувати характеристики інформаційних об'єктів цифрового двійника та розробити концептуальну модель структур даних та знань.

#### 3.3.1 Формалізація характеристик інформаційних об'єктів цифрового двійника

Для розробки структури бази даних та знань цифрового двійника необхідно виконати формалізацію основних множин об'єктів НБК та зв'язків між ними.

База даних та знань цифрового двійника НБК має містити таку основну інформацію [3,7,8]:

- результати вимірювань величин, що характеризують стан НБК;
- моделі цифрового двійника та результати прогнозування на їх основі;
- інформацію про алгоритми цифрового двійника та результати їх застосування;
- рішення, затверджені особами, що приймають рішення (ОПР);
- знання, що використовуються для підтримки прийняття рішень.

Результати вимірювань кожної величини  $v$  з множини величин  $V$ , що характеризують стан НБК, мають бути прив'язані до тривимірної сітки координат з метою їх подальшої візуалізації та обробки. Позначимо точки вимірювань як множину  $P$ , де кожний елемент  $p \in P$  являє собою вектор, що складається з координат довготи, широти та висоти розташування датчика  $d \in D$ , де  $D$  – множина датчиків НБК. Враховуючи, що в межах ІСУ задачі моніторингу та

управління НБК розподілені по різних підсистемам, кожен датчик  $d \in D$  і в межах цифрового двійника також має бути прив'язаний до певної системи  $s \in S$ , де  $S$  – множина систем НБК. В базі даних цифрового двійника НБК має зберігатися інформація про тип і поточні налаштування датчика  $d \in D$  (точка розташування  $p \in P$ , уставки, дата останньої повірки й т.п.), історія зміни його зазначених характеристик.

Для представлення результатів вимірювання будемо використовувати кортеж [3,7]:

$$r=(t, p, d, s, v, tr), \quad (3.1)$$

де  $r$  – кортеж з відношення результатів вимірювань  $R$ ;

$t$  – момент часу з точністю до секунди;

$tr$  – ознака верифікації вимірювання, яка дорівнює 1, якщо вимірювання вважається прийнятним, та 0, коли вимірювання помилкове.

Для кожної величини  $v \in V$  в системі фіксується одиниця вимірювання  $uv \in UV$ , де  $UV$  – множина одиниць виміру. Необхідно також зберігати в базі даних коефіцієнти перерахунку з однієї одиниці вимірювання в іншу (якщо такий перерахунок можливий), що можна представити у вигляді відображення [4]:

$$F_{kuv}: (UV \times UV) \rightarrow K_{uv} \quad (3.2)$$

де  $K_{uv}$  – множина коефіцієнтів перерахунку одиниць вимірювання.

Дані щодо результатів вимірювань в базу даних цифрового двійника повинні надходити з ІСУ, відповідність структур даних цих систем встановлюється в алгоритмах сервісів інтеграції. Результати вимірювань в цифровому двійнику НБУ можуть використовуватися для візуалізації даних, ідентифікації параметрів моделей та перевірки їх адекватності.

Множину моделей  $M$  цифрового двійника можна представити у вигляді [3]:

$$M = \cup m_i, \quad (3.3)$$

де  $m_i$  – модель з номером  $i$ .

Оскільки деякі моделі можуть бути використані як підмоделі в інших моделях, цей зв'язок потрібно формалізувати у вигляді бінарного відношення  $RMP(M, M) = \{(m_i, m_j)\}$ , де модель  $m_i$  є підмоделлю моделі  $m_j$ . Інформацію про ієрархічний зв'язок моделей необхідно зберігати в базі даних цифрового двійника НБК для своєчасного попередження користувачів чи блокування використання певної моделі, якщо деяка її підмодель перестала бути адекватною. Для кожної моделі  $m_i$  в цифровому двійнику має зберігатися ознака адекватності [3].

Для кожної моделі  $m_i$  виділяється множина вхідних змінних  $MVI_i \subseteq V$ , множина вихідних змінних  $MVO_i \subseteq V$  та множина параметрів  $MP_i \subseteq V$ .

Результати прогнозування та розрахунків на основі моделей з множини  $M$  мають зберігатися в базі даних цифрового двійника у вигляді кортежу [3,7]:

$$mr = (t, nmr, m_i, us, VMVI_i, VMVO_i, VMP_i), \quad (3.4)$$

де  $mr$  – кортеж з відношення результатів розрахунків по моделях  $MR$ ;

$t$  – момент часу з точністю до секунди;

$nmr$  – унікальний номер застосування моделі;

$m_i$  – модель з множини  $M$ ;

$us$  – користувач, який ініціював розрахунки, з множини користувачів USERS;

$VMVI_i$  – значення вхідних змінних моделі  $MVI_i$ ;

$VMVO_i$  – значення вихідних змінних моделі  $MVO_i$ ;

$VMP_i$  – значення параметрів моделі  $MP_i$ .

Для формування множини значень  $VMVI_i$  можуть бути використані дані з відношення результатів вимірювань  $R$ , представлені формулою (3.1), якщо вимірювання по цим величинам  $MVI_i \subseteq V$  здійснюється. Порівняння значень вихідних змінних моделі  $VMVO_i$  з фактичними даними цих величин з відношення результатів вимірювань є основою для перевірки адекватності моделі.

Якщо результати перевірки адекватності моделі  $m_i \in M$  є незадовільними, виконується процедура її параметричної ідентифікації або у випадку моделей штучного інтелекту їх навчання, результати якої можуть бути представлені у вигляді кортежу [3]:

$$mp = (t, nmp, m_i, a_j, us, VMVI_i, VMVOF_i, VMVO_i, VMP_i, CA_j), \quad (3.5)$$

де  $mp$  – кортеж з відношення результатів ідентифікації параметрів моделей  $MPR$ ;

$t$  – момент часу з точністю до секунди;

$nmp$  – унікальний номер застосування процедури ідентифікації моделі;

$m_i$  – модель з множини  $M$ ;

$a_j$  – алгоритм ідентифікації з множини  $A$  алгоритмів цифрового двійника НБК;

$us$  – користувач, який ініціював ідентифікацію моделі, з множини користувачів  $USERS$ ;

$VMVI_i$  – значення вхідних змінних моделі  $MVI_i$ ;

$VMVOF_i$  – значення фактичних вихідних змінних моделі  $MVO_i$  з відношення результатів вимірювання  $R$ ;

$VMVO_i$  – розраховані по моделі значення вихідних змінних моделі  $MVO_i$ ;

$VMP_i$  – значення параметрів моделі  $MP_i$ ;

$CA_j$  – значення оцінки адекватності моделі для знайдених значень параметрів  $VMP_i$ , яке розраховується при виконанні алгоритму  $a_j$ .

По аналогії з множиною моделей  $M$ , множину алгоритмів  $A$  цифрового двійника можна представити у вигляді [3,7]:

$$A = \cup a_j, \quad (3.6)$$

де  $a_j$  – алгоритм з номером  $j$ .

Аналогічно моделям, деякі алгоритми можуть бути використані як допоміжні в інших алгоритмах, тому цей зв'язок потрібно формалізувати у вигляді бінарного відношення  $RAP(A,A) = \{(a_i, a_j)\}$ , де алгоритм  $a_i$  є допоміжним для алгоритму  $a_j$ . Серед алгоритмів цифрового двійника можуть бути алгоритми розрахунків по моделях, ідентифікації моделей, рекомендації оптимальних рішень, та інші. Зв'язок моделей з алгоритмами потрібно формалізувати у вигляді бінарного відношення  $RMA(M,A) = \{(m_i, a_j)\}$ , де модель  $m_i$  використовується в алгоритмі  $a_j$ . Цей зв'язок задається для моделей верхнього рівня, не для підмоделей. Інформацію про зв'язок моделей та алгоритмів необхідно зберігати в базі даних цифрового двійника НБК для врахування в системі того, якщо деяка модель алгоритму не є адекватною [3].

Для кожного алгоритму  $a_j$  виділяється множина вхідних змінних  $AVI_j \subseteq V$  та множина вихідних змінних  $AVO_j \subseteq V$ .

Результати роботи деяких алгоритмів з множини  $A$  мають зберігатися в базі даних цифрового двійника. Для цього можна використати кортеж виду:

$$ar = (t, nar, a_j, us, VAVI_j, VAVO_j), \quad (3.7)$$

де  $ar$  – кортеж з відношення результатів розрахунків по алгоритмах  $AR$ ;

$t$  – момент часу з точністю до секунди;

$nar$  – унікальний номер застосування алгоритму;

$a_j$  – алгоритм з множини  $A$ ;

$us$  – користувач, який ініціював розрахунки, з множини користувачів USERS;

$VAVI_j$  – значення вхідних змінних моделі  $AVI_j$ ;

$VAVO_j$  – значення вихідних змінних моделі  $AVO_j$ .

Під час управління функціонуванням системами НБК ОПР на основі рекомендації певних алгоритмів чи без них приймають певні керуючі рішення. Для збереження інформації про них в базі даних цифрового двійника можна використовувати кортежи виду [3]:

$$pr=(t, npr, z_l, s, us, VZV_l), \quad (3.8)$$

де  $pr$  – кортеж з відношення результатів затверджених рішень  $PR$ ;

$t$  – момент часу з точністю до секунди;

$npr$  – унікальний номер затвердженого рішення;

$z_l$  – задача з множини задач  $Z$ ;

$s$  – система НБК, для якої приймалося рішення;

$us$  – користувач, який прийняв або затвердив рішення, з множини користувачів USERS;

$VZV_l$  – значення величин рішення з множини  $ZV_l \subseteq V$  для задачі  $z_l$ .

Для того, щоб порівняти затверджене ОПР рішення з тим, що пропонувалося певним алгоритмом цифрового двійника, необхідно задати зв'язок між задачами та алгоритмами. Цей зв'язок може бути представлений у вигляді відношення  $RZA(Z,A) = \{(z_l, a_j)\}$ , де задача  $z_l$  розв'язується за допомогою алгоритму  $a_j$ .

В алгоритмах підтримки прийняття рішень можуть використовуватися знання, представлені у вигляді звичайних або нечітких продукційних правил, однією з форм представлення яких є формула (2.1). Формальне представлення цих знань та їх структури даних можна реалізувати відповідно до методики, наведеній у [117]. Позначимо  $MK$  множину моделей знань цифрового двійника. Зв'язок між моделями знань та алгоритмами можна представити як відношення  $RMKA(MK, A) = \{(mk_n, a_j)\}$ , де модель знань  $mk_n \in MK$  використовується в алгоритмі  $a_j$  [3].

Розроблений опис основних інформаційних об'єктів цифрового двійника НБК у вигляді множин та відносин між ними закладає основу для концептуального моделювання структур даних.

### **3.3.2 Концептуальне моделювання та розробка структур даних та знань цифрового двійника**

Спираючись на наведену в пункті 3.3.1 формалізацію основних об'єктів цифрового двійника НБК та зв'язки між ними спроектована модель його бази даних та знань, концептуальна ER схема якої представлена на рисунку 3.6 [3,8]. Враховуючи велику кількість сутностей, які характеризують інформаційні об'єкти цифрового двійника, на схемі рисунку 3.6 представлені лише основні з них в спрощеному вигляді (без деталізації атрибутів) та зв'язки між ними в загально прийнятій нотації «воронячі лапки». Біля кожної таблиці сутності зазначено множину, введену в пункті 3.3.1.

Як видно на рисунку 3.6, до основних сутностей віднесено моделі, алгоритми, задачі, величини, вхідні та вихідні змінні моделей та алгоритмів, параметри моделей, величини задач, результати прогнозування, ідентифікації, роботи алгоритмів, прийняті рішення, одиниці виміру, користувачі, датчики, системи, точки та результати вимірювання [3,8].





Детальний опис відношення «Моделі», що відповідає сутності елементів множини моделей  $M$ , представлений у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

## Структура відношення «Моделі» (Models)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Model_ID	Ідентифікатор моделі (номер)	Натуральне
2	ModelName	Назва моделі	Текст
3	ModelStatus	Ознака адекватності моделі	Булеве
4	UP_Model_ID	Ідентифікатор моделі верхнього рівня, щодо якої поточна модель є підмоделлю	Натуральне

Тут і в подальшому назва відношення в описі таблиці дублюється англійською для зручності подальшої розробки фізичної моделі даних. Відповідно до схеми рисунку 3.6, відношення Models пов'язане відношеннями «один до багатьох» з таблицями вхідних та вихідних змінних моделей, параметрів моделей, а також відношенням «багато до багатьох» з таблицею алгоритмів.

Детальний опис відношення «Вхідні зміни моделей», що відповідає сутності елементів множини  $MVI_i$ , представлений у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

## Структура відношення «Вхідні зміни моделей» (VIModels)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Model_ID	Ідентифікатор моделі (номер)	Натуральне
2	MVIName	Назва вхідної змінної моделі	Текст
3	V_ID	Ідентифікатор величини $MVI_i \subseteq V$	Натуральне

Детальний опис відношення «Вихідні зміні моделей», що відповідає сутності елементів множини  $MVO_i$ , представлений у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

## Структура відношення «Вихідні зміні моделей» (VOModels)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Model_ID	Ідентифікатор моделі (номер)	Натуральне
2	MVOName	Назва вихідної змінної моделі	Текст
3	V_ID	Ідентифікатор величини $MVO_i \subseteq V$	Натуральне

Детальний опис відношення «Параметри моделей», що відповідає сутності елементів множини  $MP_i$ , представлений у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

## Структура відношення «Параметри моделей» (PModels)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Model_ID	Ідентифікатор моделі (номер)	Натуральне
2	MPName	Назва параметру моделі	Текст
3	V_ID	Ідентифікатор величини $MP_i \subseteq V$	Натуральне

Зв'язок моделей та алгоритмів цифрового двійника представляється у вигляді відношення, наведеного у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

## Структура відношення RMA

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Model_ID	Ідентифікатор моделі (номер)	Натуральне
2	Algorithm_ID	Ідентифікатор алгоритму (номер)	Натуральне

Таблиці вхідних, вихідних змінних та параметрів моделей задіяні у відображенні результатів прогнозування, ідентифікації моделей та в прийнятих рішеннях з управління процесами НБК. Оскільки ці об'єкти є підмножинами узагальненої множини величин  $V$ , їх таблиці також пов'язані з таблицею величин.

Опис відношення «Результати прогнозування» на основі формули (3.4), що відповідає сутності елементів відношення  $MR$ , представлений у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

## Структура відношення «Результати прогнозування» (ForecastResults)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	NMR_ID	Ідентифікатор застосування моделі (номер)	Натуральне
2	t	Дата та час виконання прогнозу	Дата
3	Model_ID	Ідентифікатор моделі (номер), по якій відбувався прогноз	Натуральне
4	User_ID	Ідентифікатор користувача, що здійснював прогнозування	Натуральне
5	VMVI	Масив значень вхідних змінних моделі, для яких здійснювався прогноз	Масив
6	VMVO	Масив значень вихідних змінних - результати прогнозування	Масив
7	VMVP	Масив значень параметрів моделі, для яких здійснювався прогноз	Масив

В якості значень масиву значень вхідних змінних можуть використовуватися результати вимірювання величин за допомогою датчиків, а значення вихідних змінних можуть також порівнюватися з результатами

вимірювань для прийняття рішення щодо адекватності моделі. Якщо модель неадекватна, відбувається відповідне позначення в таблиці Models і розробниками вносяться зміни до її структури чи застосовується процедура її параметричної ідентифікації. Результати параметричної ідентифікації заносяться у відповідну таблицю.

Опис відношення «Результати ідентифікації», що відповідає сутності елементів відношення *MPR* заданій формулою (3.5), представлений у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Структура відношення «Результати ідентифікації» (IdentificationResults)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	NMP_ID	Ідентифікатор сеансу ідентифікації моделі (номер)	Натуральне
2	t	Дата та час виконання прогнозу	Дата
3	Model_ID	Ідентифікатор моделі (номер), по якій відбувався прогноз	Натуральне
4	Algorithm_ID	Ідентифікатор алгоритму ідентифікації	Натуральне
5	User_ID	Ідентифікатор користувача, що здійснював ідентифікацію	Натуральне
6	VMVI	Масив значень вхідних змінних моделі	Масив
7	VMVO	Масив розрахованих по моделі значень вихідних змінних	Масив
8	VMVOF	Масив фактичних значень вихідних змінних	Масив
9	VMVP	Масив значень параметрів моделі, для яких здійснювався прогноз	Масив
10	CA	Оцінка адекватності моделі	Число

Враховуючи, що в таблицях результатів прогнозування по моделі та ідентифікації моделей значення змінних та параметрів представляються масивами, впорядкованими відповідно до слідування цих величин в таблицях 3.3, 3.4 та 3.5, змінювати перелік змінних та параметрів моделі після початку її використання неможливо, що має контролюватися процедурами розробленої бази даних. При необхідності внесення зазначених змін, що впливають на структуру моделі, необхідно створювати нову модель, а стару версію моделі позначати як неадекватну та виключати з використання.

Детальний опис відношення «Величини», що відповідає сутності елементів множини  $V$ , представлений у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

## Структура відношення «Величини» (Values)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	V_ID	Ідентифікатор величини (номер)	Натуральне
2	ValueName	Назва величини	Текст
3	Unit_ID	Ідентифікатор одиниці вимірювання	Натуральне

Одиниці виміру величин, які формалізовані у вигляді елементів множини UV, представляються у вигляді відношення, наведеного у таблиці 3.9

Таблиця 3.9

## Структура відношення «Одиниці виміру» (MeasurementUnits)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Unit_ID	Ідентифікатор одиниці виміру	Натуральне
2	UnitName	Назва одиниці виміру	Текст

Зв'язок різних одиниць виміру та коефіцієнти перерахунку задаються відношенням ValueUnitsKoef, структура якого наведена у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

## Структура відношення «ValueUnitsKoef»

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Unit_ID_first	Ідентифікатор першої одиниці	Натуральне
2	Unit_ID_second	Ідентифікатор другої одиниці	Натуральне
3	KUV	Коефіцієнт перерахунку	Число

Відношення ValueUnitsKoef містить інформації для реалізації формули перерахунку одиниць виміру:

$$Unit\_ID\_first = Unit\_ID\_second \cdot KUV. \quad (3.9)$$

Результати вимірювання величин датчиками системи представляються у вигляді відношення «Результати вимірювання», наведеного в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11

## Структура відношення «Результати вимірювання» (MeasurementResults)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	t	Дата та час вимірювання	Дата
2	Point_ID	Ідентифікатор точки вимірювання	Натуральне
3	Sensor_ID	Ідентифікатор датчика	Натуральне
4	System_ID	Ідентифікатор системи	Натуральне
5	V_ID	Ідентифікатор величини (номер)	Натуральне
6	MR_Value	Виміряне значення	Число
7	TR	Ознака достовірності вимірювання	Булеве

Точки вимірювання величин з множини  $P$  представляються у вигляді відношення, структура якого наведена у таблиці 3.12.

Таблиця 3.12

## Структура відношення «Точки вимірювання» (MeasurementPoints)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Point_ID	Ідентифікатор точки вимірювання	Натуральне
2	PointName	Назва точки вимірювання	Текст
3	PointX	Абсциса точки вимірювання	Число
4	PointY	Ордината точки вимірювання	Число
5	PointZ	Висота розташування точки вимірювання	Число

У відношенні «Точки вимірювання» передбачається використання координат їх розташування, в ролі яких можуть бути широта, довгота та висота над рівнем моря або спеціально введені координати відносно певної точки конструкції НБК, обраної як початок координат.

Множина  $D$  датчиків НБК представляється у вигляді відношення, структура якого наведена у таблиці 3.13.

Таблиця 3.13

## Структура відношення «Датчики» (Sensors)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Sensor_ID	Ідентифікатор датчика	Натуральне
2	SensorName	Назва датчика	Текст
3	SensorType	Тип датчика	Перерахування
4	Point_ID	Ідентифікатор точки вимірювання	Натуральне
5	System_ID	Ідентифікатор системи	Натуральне
6	Sensor_TR	Ознака працездатності датчика	Булеве

За необхідності відношення «Датчики» може бути доповнене окремими таблицями з інформацією про технічне обслуговування та налаштування цього обладнання.

Множина  $S$  систем НБК представляється у вигляді відношення, структура якого наведена у таблиці 3.14.

Таблиця 3.14

## Структура відношення «Системи» (Systems)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	System_ID	Ідентифікатор системи	Натуральне
2	SystemName	Назва системи	Текст
3	UP_System_ID	Ідентифікатор системи верхнього рівня, щодо якої поточна система є підсистемою	Натуральне

Як видно з таблиці 3.14, відношення «Системи» дозволяє врахувати ієрархію систем НБК.

Інформація про користувачів цифрового двійника представляється у вигляді відношення, структура якого наведена у таблиці 3.15.

Таблиця 3.15

## Структура відношення «Користувачі» (Users)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	User_ID	Ідентифікатор користувача (логін)	Натуральне
2	UserName	Прізвище, ім'я, по-батькові	Текст
3	UserType	Тип користувача, що визначає його права доступу	Перерахування



Слід зазначити, що наразі відношення «Користувачі» представлене у спрощеній структурі й може бути змінене та доповнене на етапі програмної реалізації після вибору засобів реалізації та архітектури застосунку, й відповідно коли будуть вирішені питання кібернетичної безпеки та організації розподілу прав доступу. Враховуючи сучасні підходи до організації роботи користувачів, логін та пароль мають бути надійно захищені, доступ до окремих частин цифрового двійника має мати окремі ключі та рівні (наприклад: перегляд, редагування), ключі мають об'єднуватися в профілі доступу, які призначаються певним групам користувачів, а один користувач може бути включеним в кілька груп користувачів.

Множина алгоритмів А цифрового двійника НБК, що використовуються для розрахунків по моделям, їх ідентифікації та прийняття рішень, представляються у вигляді відношення, структура якого наведена в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17

Структура відношення «Алгоритми» (Algorithms)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Algorithm_ID	Ідентифікатор алгоритму (номер)	Натуральне
2	AlgorithmName	Назва алгоритму	Текст
3	AlgorithmSave	Ознака необхідності зберігання результатів роботи алгоритму	Булеве
4	UP_Algorithm_ID	Ідентифікатор алгоритму верхнього рівня, щодо якого поточний алгоритм є допоміжним	Натуральне

Відношення «Алгоритми» враховує ієрархічну структуру множини алгоритмів цифрового двійника, їх реалізацію бажано виконати у вигляді сервісів.

По аналогії з моделями, задаються відношення вхідних та вихідних змінних алгоритмів.

Детальний опис відношення «Вхідні зміні алгоритмів», що відповідає сутності елементів множини  $AVI_j$ , представлений у таблиці 3.18.

Таблиця 3.18

Структура відношення «Вхідні зміні алгоритмів» (VIAgorithms)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Algorithm_ID	Ідентифікатор алгоритму (номер)	Натуральне
2	AVIName	Назва вхідної змінної алгоритму	Текст
3	V_ID	Ідентифікатор величини $AVI_j \subseteq V$	Натуральне

Детальний опис відношення «Вихідні зміні алгоритмів», що відповідає сутності елементів множини  $AVO_j$ , представлений у таблиці 3.19.

Таблиця 3.19

Структура відношення «Вихідні зміні алгоритмів» (VOAlgorithms)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Algorithm_ID	Ідентифікатор алгоритму (номер)	Натуральне
2	AVOName	Назва вихідної змінної алгоритму	Текст
3	V_ID	Ідентифікатор величини $AVO_j \subseteq V$	Натуральне

Для збереження в системі цифрового двійника НБК з метою подальшого аналізу результатів роботи деяких алгоритмів відповідно до формули (3.7), у яких встановлена ознака AlgorithmSave, пропонується використовувати відношення, структура якого наведена у таблиці 3.20.

Таблиця 3.20

## Структура відношення «Результати алгоритмів» (AlgorithmResults)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	NAR_ID	Ідентифікатор застосування алгоритму (номер)	Натуральне
2	t	Дата та час виконання алгоритму	Дата
3	Algorithm_ID	Ідентифікатор алгоритму (номер), результати роботи якого зберігаються	Натуральне
4	User_ID	Ідентифікатор користувача, що використовував алгоритм	Натуральне
5	VAVI	Масив значень вхідних змінних алгоритму, для яких здійснювався розрахунок	Масив
6	VAVO	Масив значень вихідних змінних - результати розрахунків	Масив

Алгоритми цифрового двійника можуть бути використані в задачах прийняття рішень при управлінні його системами. Множина  $Z$  задач прийняття рішень НБК представляється у вигляді відношення, структура якого наведена у таблиці 3.21.

Таблиця 3.21

## Структура відношення «Задачі» (Tasks)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Task_ID	Ідентифікатор задачі (номер)	Натуральне
2	TaskName	Назва задачі	Текст
3	System_ID	Ідентифікатор системи	Натуральне

Як показано на рисунку 3.6, для кожної задачі задається множина величин, щодо значень яких має бути прийняте рішення. Структура відповідного відношення представлена у таблиці 3.22.

Таблиця 3.22

Структура відношення «Величини задач» (TaskValues)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Task_ID	Ідентифікатор задачі (номер)	Натуральне
2	ZVName	Назва змінної задачі	Текст
3	V_ID	Ідентифікатор величини $ZV_l \subseteq V$	Натуральне

Результати прийняття рішень по задачам відповідальними особами представляються відповідно до формули (3.8) у вигляді відношення, структура якого наведена у таблиці 3.23.

Таблиця 3.23

Структура відношення «Результати прийняття рішень» (TaskResults)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	NPR_ID	Ідентифікатор рішення	Натуральне
2	T_r	Дата та час підготовки рішення	Дата
3	T_c	Дата та час затвердження рішення	Дата
4	Task_ID	Ідентифікатор задачі (номер)	Натуральне
5	System_ID	Ідентифікатор системи	Натуральне
6	User_ID_r	Ідентифікатор користувача, що підготував рішення	Натуральне
7	User_ID_c	Ідентифікатор користувача, що затвердив рішення	Натуральне
8	VZV	Масив значень змінних задачі	Масив

Відношення «TaskResults» дозволяє зафіксувати час та відповідальних осіб за підготовку та затвердження рішення, що враховує ієрархічну структуру управління НБК. Якщо деяких задачах це може бути одна й та сама особа, то відповідні поля заповнюються однаковими значеннями.

При прийнятті рішень можуть бути використані моделі та алгоритми цифрового двійника, для налаштування чого пропонується використовувати відношення, структура якого наведена у таблиці 3.24.

Таблиця 3.24

## Структура відношення «Автоматизація задач» (TaskAutomation)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Task_ID	Ідентифікатор задачі (номер)	Натуральне
2	ObjectType	Тип: модель чи алгоритм	Перерахування
3	Object_ID	Ідентифікатор моделі або алгоритму	Натуральне

Результати використання моделей або алгоритмів цифрового двійника НБК в задачах підтримки прийняття рішень потрібно фіксувати для подальшого аналізу діяльності осіб, що приймають рішення, та порівнювати з фактичними даними. Для цього розроблено відношення зі структурою у таблиці 3.25.

Таблиця 3.25

## Структура відношення «Результати автоматизації» (TaskAutomationResults)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	Task_ID	Ідентифікатор задачі (номер)	Натуральне
2	ObjectType	Тип: модель, алгоритм, вимірювання	Перерахування
3	ObjectResult_ID	Ідентифікатор результату моделі або алгоритму або вимірювання	Натуральне

У відношенні TaskAutomationResults використовуються посилання на кортежі з результатами використання моделей чи алгоритмів, представлених відношеннями у таблицях 3.6 та 3.20.

Для вирішення задач прийняття рішень можуть бути використані моделі та методи AI, засновані на знаннях. Наприклад, розроблений у розділі 2 метод нейро-нечіткого управління вентиляційними установками, який використовує нечітке логічне виведення Такагі-Сугено по базі правил нечітких продукцій. Відповідно, структури даних цифрового двійника мають включати базу знань. Для збереження знань пропонується використовувати наявні підходи, розроблені іншими авторами, наприклад представлені у роботі [117].

Таким чином, розроблено модель бази даних та знань цифрового двійника, яка містить всю необхідну інформації для його використання й може бути покладена в основу його програмної реалізації.

### **Висновки до розділу 3**

1. На основі аналізу характеристик існуючої інтегрованої системи управління НБК, представленого в розділі 2, сформовано нефункціональні та функціональні вимоги до його цифрового двійника. Нефункціональні вимоги сформували загальні обмеження та специфіку реалізації програмного забезпечення цифрового двійника. Функціональні вимоги, представлені діаграмою прецедентів, визначили узагальнені ролі користувачів цифрового двійника та основні функції. Користувачі поділені на адміністраторів, розробників та аналітиків, серед останніх виділені оператори та керівники. До основних функцій цифрового двійника віднесено візуалізацію та аналіз даних, моделювання процесів та забезпечення підтримки прийняття рішень, можливості розробки та удосконалення складових цифрового двійника та налаштування їх

роботи. Зазначені вимоги покладені в основу розробки архітектури цифрового двійника та моделей структур його даних та знань.

2. Розроблено узагальнену архітектуру цифрового двійника НБК, яка має багаторівневу структуру, побудовану з використанням модульного принципу. Ця архітектура дозволяє використовувати можливості існуючих інформаційних системи НБК та врахувати особливості його функціонування, забезпечити вирішення задач візуалізації інформації, моделювання та прогнозування стану НБК, реалізувати підтримку прийняття рішень з управління його процесами. Враховуючи значний плановий термін експлуатації НБК, в архітектуру його цифрового двійника закладено можливості додавання нових та удосконалення існуючих модулів. Представлені архітектурні рішення цифрового двійника враховано при розробці моделі його бази даних та знань.

3. Формалізовано на основі математичного апарату теорії множин основні інформаційні об'єкти цифрового двійника НБК, до яких включено результати вимірювань за допомогою датчиків систем тих величин, що характеризують його стан, моделі та алгоритми, вхідні та вихідні дані прогнозування та ідентифікації моделей, знання та результати використання алгоритмів та прийняття рішень з управління процесами НБК. На основі формалізованих множин та відношень розроблено концептуальну модель, яка відображає основні сутності моделі даних цифрового двійника та зв'язки між ними, сформовано детальний опис атрибутів цих сутностей з використанням підходів реляційної моделі представлення інформації. За рахунок використання 3D координат створена модель розширила можливості аналізу та візуалізації поточних та історичних даних про стан НБК, заклала можливості для моделювання його процесів та підтримки прийняття рішень. Отримані результати дозволяють провести розробку програмного забезпечення модулів цифрового двійника.

## **РОЗДІЛ 4**

### **РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ 3D ВІЗУАЛІЗАЦІЇ СТАНУ НБК**

Як було зазначено в розділі 3 під час формування вимог та розробки архітектури цифрового двійника НБК, однією з його головних функцій є 3D візуалізація інформації про стан цього об'єкту. Під 3D візуалізацією стану НБК розуміється відображення даних про виміряні за допомогою датчиків або розраховані на основі моделей значення набору його характеристик в системі тривимірних координат з прив'язкою до будівельних конструкцій споруд НБК та ОУ. В розділі 1 було розглянуто набір потужних інструментів для реалізації 3D візуалізації різних об'єктів, однак НБК є унікальним об'єктом в світі, тому наявні бібліотеки не містять готових моделей його компонентів. Крім того, використання хмарних сервісів для об'єктів з таким рівнем радіаційної та ядерної небезпеки, особливо в умовах воєнного стану, не є доцільним, що свідчить про необхідність проведення досліджень та застосування сучасних засобів програмної інженерії для розробки спеціалізованого програмного забезпечення для 3D візуалізацією стану НБК як складової його цифрового двійника. В даному розділі наведено формування вимог до програмного забезпечення 3D візуалізації стану НБК, розробка його архітектури та моделей даних, вибір засобів реалізації та результати 3D моделювання.

#### **4.1 Формування вимог до 3D візуалізації стану НБК**

Як було показано в підрозділі 2.1, ІСУ НБК здійснює моніторинг його стану з використанням різноманітних сенсорів, розташованих в певних точках споруди. Відповідно до представленої в підрозділі 3.2 архітектури цифрового двійника, ця



інформації передається до нього з ІСУ для подальшої обробки та використання, в тому числі для 3D візуалізації з метою поліпшення можливостей аналізу та прийняття рішень персоналом НБК. Програмне забезпечення 3D візуалізації як складова цифрового двійника має реалізовувати представлення цифрової геометричної моделі НБК та ОУ, структура якої наведена на рисунку 3.5., тобто відображати з додержанням масштабу будівельні конструкції споруд НБК, ОУ та візуалізацію устаткування. Інформація про стан НБК як масив значень його характеристик, виміряних сенсорами в певних точках або прогнозованих за допомогою моделей, має відображатися на цифровій геометричній моделі НБК та ОУ з використанням заданої певним чином тривимірної системи координат. Детально функціональні вимоги до програмного забезпечення 3D візуалізації стану НБК представлено на рисунку 4.1.

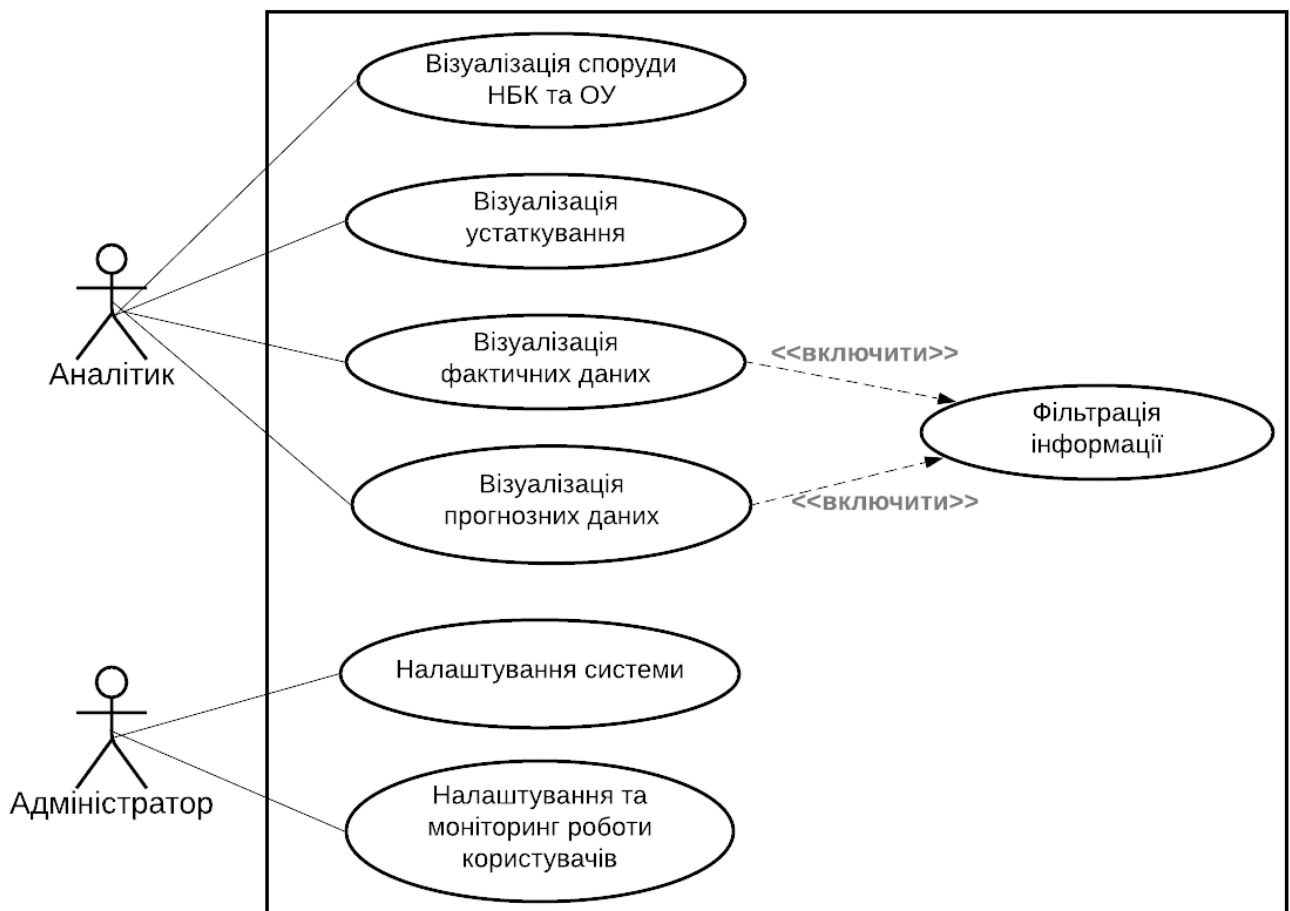


Рис. 4.1. Діаграма варіантів використання 3D візуалізації стану НБК

Як видно на рисунку 4.1, варіанти використання програмного забезпечення є деталізацією діаграми прецедентів цифрового двійника НБК, представленої в підрозділі 3.1. Користувачами цього програмного забезпечення є співробітники ЧАЕС з ролями Аналітик та Адміністратор, опис яких наведено у підрозділі 3.1.

Функціональні можливості користувача з роллю Аналітик цього програмного забезпечення враховують наступні вимоги [5]:

- 3D візуалізація споруди НБК та ОУ, з можливістю зміни масштабу, повертання, демонстрації шарів будівельних конструкцій;
- 3D візуалізація устаткування в місцях його розташування на цифровій геометричній моделі НБК та ОУ з можливістю зміни масштабу, повертання;
- 3D демонстрація точок розташування датчиків (точок вимірювання) та їх показників;
- в залежності від налаштувань при відображенні інформації за період показувати мінімальне, максимальне, середнє значення, та середньоквадратичне відхилення, з можливістю обрати кілька варіантів;
- кольорова підсвітка значень показників датчиків в залежності від налаштованих інтервалів значень (зелений, жовтий, червоний);
- можливості фільтрації (вибору) значень датчиків за типом датчику, множиною датчиків (точок вимірювання), підсистемою ІСУ, відповідно підсвітка та виведення значень працюють по вибраній підмножині даних.

Як зазначалося вище, реалізація 3D візуалізації стану НБК передбачає відображення в трьох вимірному просторі даних про фактичні чи прогнозовані значення величин, що його характеризують. Фактичні дані про стан НБК реєструються наявним технічним та програмним забезпеченням ІСУ, зберігаються в її базі даних та передаються за допомогою спеціальних інтерфейсів до структур даних цифрового двійника. Прогнозовані дані про стан НБК є результатом застосування моделей, які входять до складу цифрового двійника [13].

Користувач з роллю Адміністратор виконує налаштування роботи цього програмного продукту, веде базу його користувачів, налаштовує їм доступ до функцій продукту та здійснює моніторинг їх роботи.

Слід зазначити, що розробка програмного продукту на основі всіх зазначених вимог на даному етапі неможлива або недоцільна. Наприклад, створення цифрових геометричних моделей устаткування НБК та ОУ потребує багато часу й не входить до даного дослідження. Крім того, для реалізації відображення прогнозних даних необхідна заповнена база моделей цифрового двійника, розробка якої потребує великої команди фахівців. Тому на даному етапі розробляється прототип програмного продукту з обмеженими функціональними можливостями. В прототипі буде реалізовано відображення лише фактичних даних про стан НБК (поточних чи історичних), однак при розробці архітектури програмного забезпечення потрібно врахувати можливість роботи й з прогнозованими даними.

## **4.2 Архітектура програмного забезпечення 3D візуалізації стану НБК**

Як було зазначено в підрозділі 3.2, для розробки програмного забезпечення цифрового двійника доцільно використати мікросервісну архітектуру. Відомо, що мікросервісна архітектура передбачає поділ додатку на більш дрібні, при цьому повністю незалежні складові, що дозволяє збільшити гнучкість і масштабованість. Мікросервіси дозволяють проблеми, які властиві застарілим монолітним системам. Цей тип архітектури передбачає розробку програмного забезпечення як набору невеликих сервісів, кожен з яких має свої власні функції та може бути незалежно розгорнутий, така технологія простіша для проектування та розробки, дає змогу реалізувати безперервне постачання та поліпшення продукту. Це є дуже важливо, враховуючи тривалий термін експлуатації НБК,

архітектура його цифрового двійника має забезпечувати можливість постійного розвитку та удосконалення.

Архітектура мікросервісів також використовує бібліотеки, але в цілому їх основний спосіб полягає в розбитті додатку шляхом поділу на сервіс. Під бібліотекою розуміються певні компоненти, що підключаються до програми та викликаються нею в тому ж самому процесі. На відміну від бібліотек сервіси є компоненти, які виконуються в окремих процесах і комунікують між собою за допомогою веб-запитів чи *remote procedure call (RPC)* [118].

Мартін Фаулер дав визначення архітектурі мікросервісів як способу до створення множини невеликих сервісів, які працюють як єдиний програмний додаток. Сервіси здійснюють обмін через певні механізми, наприклад HTTP протокол, та кожен сервіс працює окремо в своєму власному процесі [119]. Таким чином, вся функціональність додатку в архітектурі мікросервісів поділена на окремі модулі, що взаємодіють між собою через певні методи, що отримали назву API (інтерфейси прикладного програмування). Завдяки цьому кожен сервіс має свою область і має можливість незалежно оновлюватися, розгортатися та масштабуватися [120].

До переваг мікросервісної архітектури слід віднести високий рівень відмовостійкості, тому що будь-яка помилка в додатку впливає лише на конкретний сервіс, не порушуючи роботу системи в цілому. Завдяки цьому всі зміни, удосконалення та навіть експерименти можуть бути реалізовані з меншими ризиками та з меншою кількістю помилок. Також слід відмітити можливість широкого вибору стеку технологій. Для кожного сервісу можуть бути застосовані різні рішення та структури. Також мікросервісна архітектура дозволяє більш просто здійснювати управління роботою програмного забезпечення та полегшує його розуміння завдяки його розбиттю на більш дрібні та прості компоненти, що дозволяє сконцентруватися на їх функціональних можливостях. Слід відмітити, що зазначені переваги базуються на незалежності компонентів. Це також

дозволяє набагато легше додавати нові функціональні можливості в мікросервісну архітектуру в порівнянні з традиційною монолітною. При необхідності внесення змін потрібно змінити та перезапустити лише той сервіс, якого вони торкаються, а не весь програмний продукт, як у випадку монолітної архітектури. Також це дозволяє вирішити проблему стійкості та продуктивності роботи системи при зростанні кількості користувачів програмного продукту [121]. Однак мікросервісній архітектурі властиві також і недоліки, які можна сказати витікають з її переваг. До основних недоліків застосування мікросервісів слід віднести розподіленість системи. Сама по собі архітектура мікросервісів є складною системою, яка складається зазвичай з декількох модулів та баз даних, тому забезпечення правильності необхідних з'єднань вимагає достатньо багато часу і високого рівня підготовки фахівців. Також розгортання багатьох незалежних сервісів збільшує вимоги та витрати до технічного та системного програмного забезпечення [122]. З метою забезпечення інкапсуляції оточення виконання сервісу для нього необхідно виділити окрему віртуальну машину, що може привести до неповного використання її ресурсів. Для подолання цієї проблеми застосовується технологія контейнеризації, яка надає приватне оточення в межах операційної системи. Дана технологія відома під назвою віртуалізація операційної системи [123]. В даній технології ядро операційної системи надає окремий віртуальний простір, що називається контейнером. Платформа Docker є мабуть найпопулярнішою серед тих, що використовують технологію контейнеризації [124]. Ця платформа вирішує задачі доставки коду на сервер, його запуск, та забезпечує однаковість оточення виконання. Зазначене надає можливість ізолювати сервіси від технічної інфраструктури та забезпечити її ефективне використання.

Враховуючи зазначені переваги, на основі технології мікросервісів було розроблено наведену на рисунку 4.2 архітектуру програмного забезпечення для 3D візуалізації стану НБК [5,13].

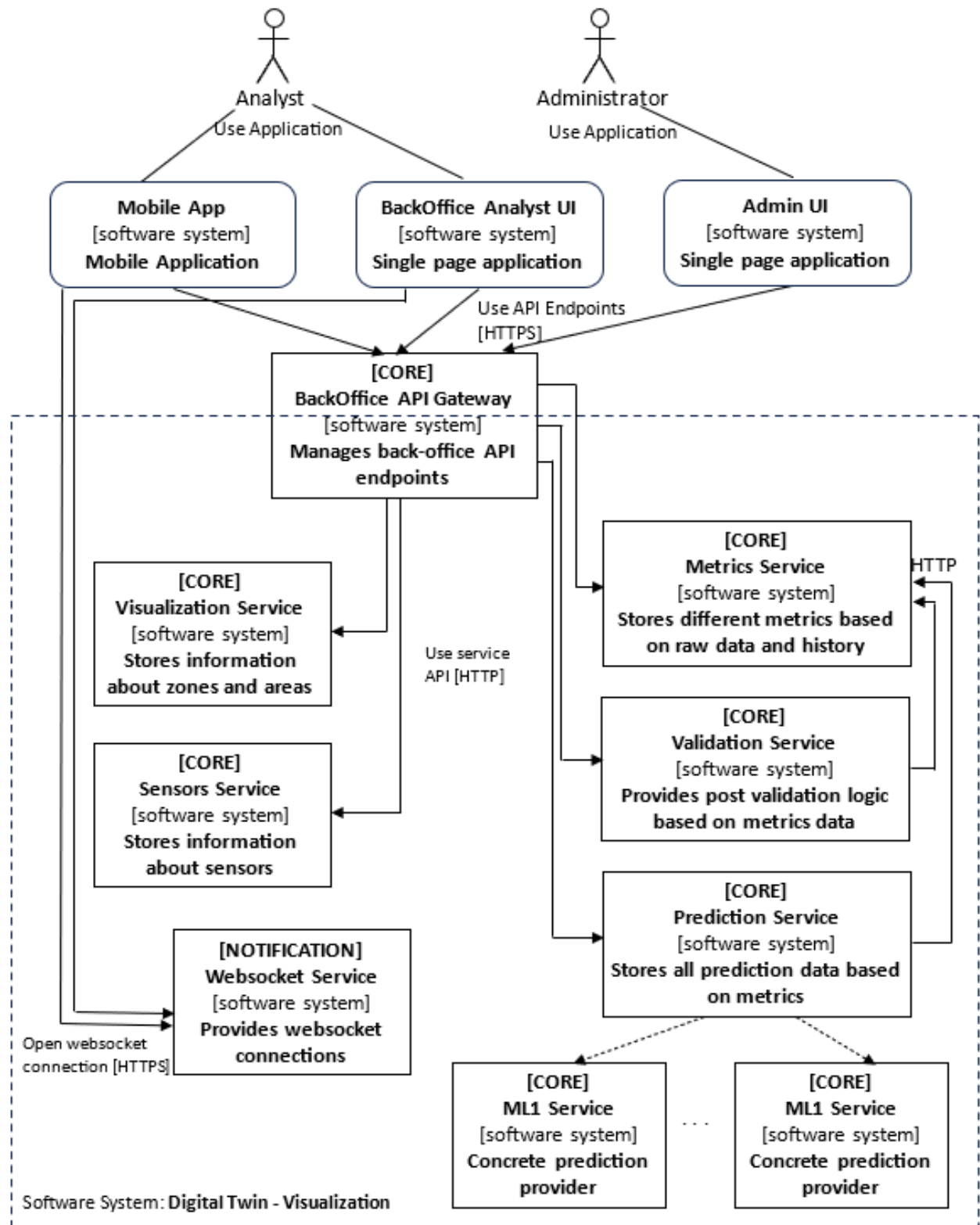


Рис. 4.2. Архітектура програмного забезпечення для 3D візуалізації стану НБК

Як видно на рисунку 4.2, відповідно до представленої в підрозділі 4.1 діаграми варіантів використання, з програмним забезпеченням 3D візуалізації

стану НБК як складової його цифрового двійника взаємодіють користувачі з ролями Аналітик та Адміністратор. Адміністратор виконує роботи з програмним забезпеченням використовуючи свою панель Admin UI. Аналітики можуть використовувати інтерфейс для персонального комп'ютера BackOffice Analyst UI або мобільний застосунок. Інтерфейс панелей для персонального комп'ютера виконується на основі технології Web. Мобільний застосунок на етапі розробки прототипу не створювався, перелік його функцій має бути менше, ніж в інтерфейсі для персонального комп'ютера. Передбачається використання мобільного застосунку персоналом, що переміщується по території НБК, або керівництвом, для моніторингу основних показників стану НБК, аварійних сигналів та оповіщень. Модулі інтерфейсу користувачів здійснюють комунікацію зі шлюзом програмного забезпечення 3D візуалізації (BackOffice API Gateway) на основі захищених протоколу HTTPS, використовуючи його API. Шлюз здійснює зв'язок з сервісами програмного забезпечення [5]. Стрілками показано виклики об'єктів. Далі наведено опис кожного з сервісів.

Сервіс візуалізації (Visualization Service) зберігає інформацію про цифрову геометричну модель НБК та ОУ, їх топологію та реалізує відповідну 3D візуалізацію інформації.

Сервіс датчиків (Sensors Service) містить інформацію про сенсори систем, та точки вимірювання, реалізує їх відображення.

Сервіс показників (Metrics Service) містить інформацію про величини (характеристики стану НБК та ОУ) та їх значення, в тому числі фактичні поточні, фактичні історичні та прогнозовані, також виконує розрахунки та збереження агрегованих показників (середнє, середньоквадратичне, мінімальне, максимальне тощо) по цих даних.

Сервіс перевірок (Validation Service) виконує контроль допустимих границь показників, розраховуючи колір відображення при візуалізації значень величин, коректність запису налаштувань, введених користувачами.

Сервіс прогнозу (Prediction Service) за допомогою сервісів моделей (ML1...MLN) виконує розрахунок прогнозованих значень величин, їх зберігання та передачу до сервісу показників для обробки.

Сервіс оповіщень (NOTIFICATION) реалізує зв'язок з модулями інтерфейсів користувачів для передачі інформації про вихід показників стану НБК за встановлені межі (жовтий та червоний колір), інші аварійні ситуації.

Взаємодія шлюзу з сервісами та сервісів між собою здійснюється на основі протоколу HTTP з використанням шини передачі даних (Message Bus), яка не зображена на рисунку 4.2, оскільки є стандартним елементом. Архітектура сервісів є достатньо типовою. Узагальнена структура сервісу програмного забезпечення для 3D візуалізації стану НБК наведена на рисунку 4.3 [5].

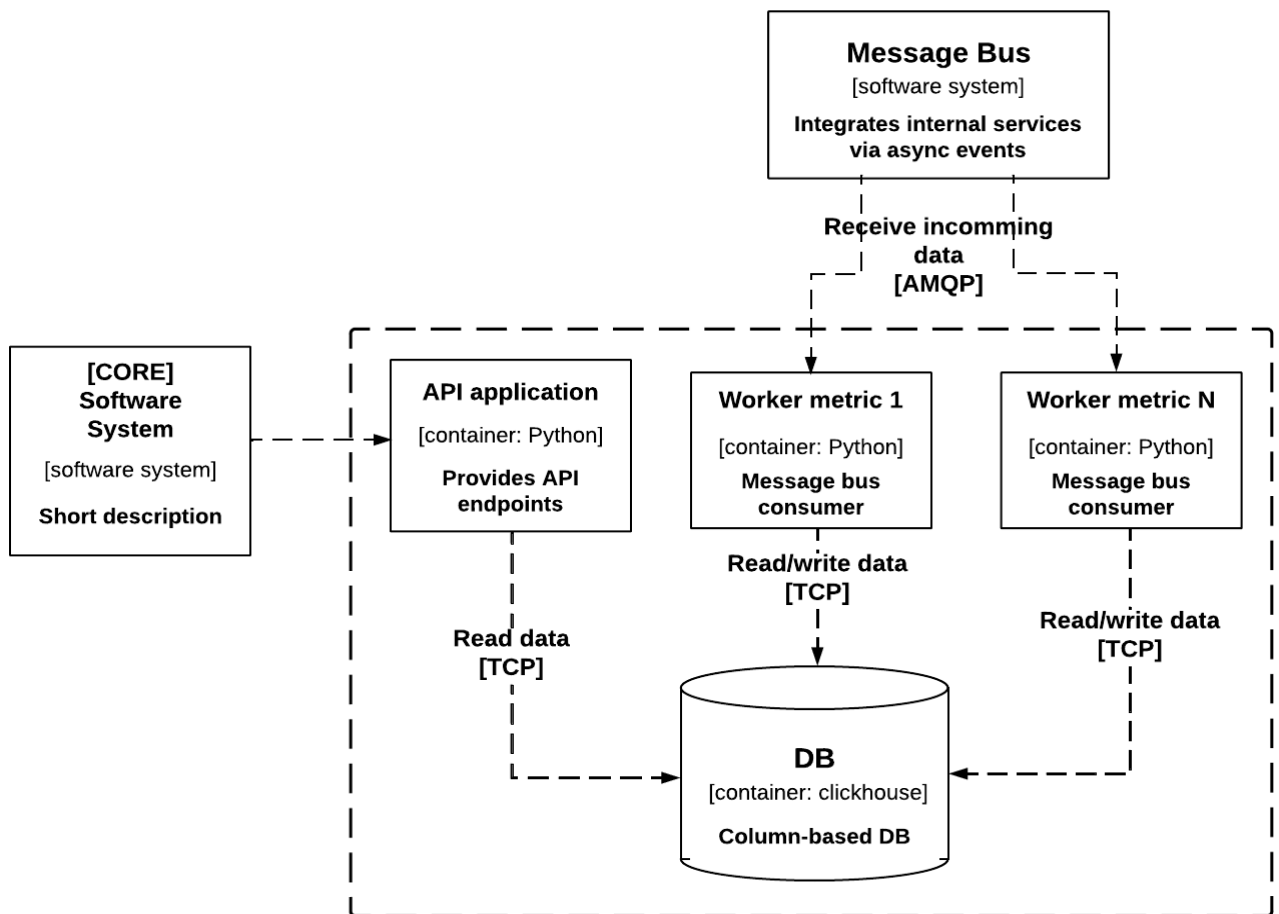


Рис. 4.3. Узагальнена структура сервісу програмного забезпечення для 3D візуалізації стану НБК



Схема розгортання сервісів, яка є стандартною для реалізації мікросервісної архітектури, наведена на рисунку 4.4.

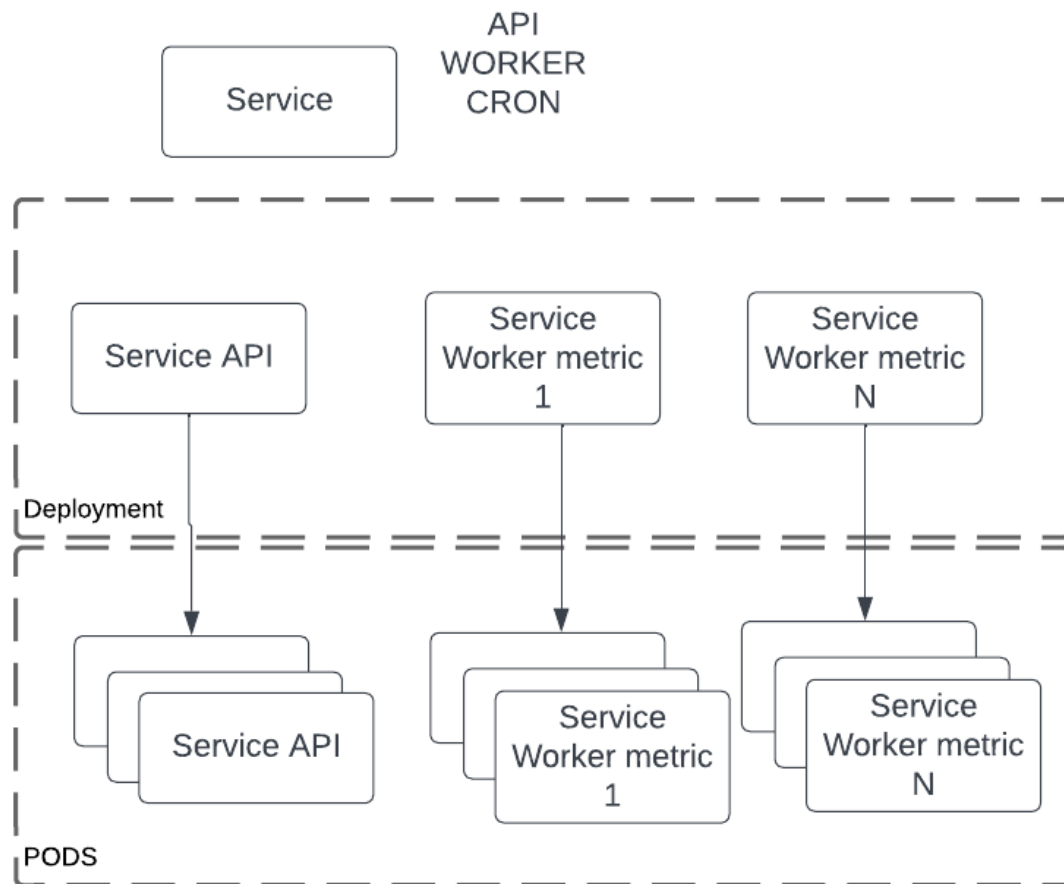


Рис. 4.4. Схема розгортання сервісів програмного забезпечення для 3D візуалізації стану НБК

Як було зазначено, реалізацію розробленої мікросервісної архітектури програмного забезпечення для 3D візуалізації стану НБК слід виконати на основі технології Docker. Для управління контейнерами Docker рекомендується обрати Kubernetes, яка є платформою з відкритим вихідним кодом для управління контейнеризованими робочими навантаженнями та супутніми службами. Її основні характеристики є кросплатформенність, розширюваність, успішне використання декларативної конфігурації та автоматизації. Вона має гігантську, швидкопрогресуючу екосистему [124].

Система Kubernetes надає можливість виконання функцій [124]:

- виявлення сервісів та балансування навантаження завдяки наданню доступу до контейнера, використовуючи DNS-ім'я або його власну IP-адресу, в тому числі якщо контейнер зазнає занадто великого мережевого навантаження, Kubernetes здатний збалансувати та розподілити його таким чином, щоб якість обслуговування залишалась стабільною;
- оркестрація сховища інформації завдяки автоматичному монтуванню системи збереження інформації на основі заданих налаштувань: локальні сховища, рішення від хмарних провайдерів тощо;
- автоматичне розгортання та відкатування на основі заданого користувачем бажаного стану контейнерів, що розгортаються, та відстеження виконання цього стану;
- автоматичне розміщення задач на основі вказаного користувачем кластеру та визначеного обсягу обчислювальних ресурсів, необхідних для роботи кожного контейнеру, при цьому Kubernetes розподіляє контейнери по вузлах кластера для максимально ефективного використання ресурсів;
- самозцілення завдяки можливостям Kubernetes перезапускати контейнери, що відмовили, замінити контейнери та зупинити роботу контейнерів, що не відповідають на задану користувачем перевірку стану, при цьому система не повідомляє про них клієнтам, доки ці контейнери не будуть у стані робочої готовності;
- управління секретами та конфігурацією завдяки можливостям Kubernetes надійно зберігати та керувати чутливою інформацією, такою як паролі, OAuth токени та SSH ключі, в тому числі можна розгорнути та оновлювати секрети та конфігурацію без перезбирання образів ваших контейнерів, не розкриваючи секрети в конфігурацію стека [124].

Ще одним важливим елементом для забезпечення використання як програмного забезпечення для 3D візуалізації стану НБК, так й його цифрового двійника в цілому є система моніторингу роботи інфраструктури. В якості такої системи рекомендується обрати Prometheus, який є системою моніторингу з відкритим вихідним кодом на основі заданого набору показників. Він збирає дані зі служб і хостів, надсилаючи HTTP-запити на кінцеві точки метрик, після чого зберігає результати в базі даних часових рядів і робить їх доступними для аналізу та попередження. Використання системи Prometheus дозволяє отримати сповіщення, коли буде виявлена проблема в роботі, надати інформацію для аналізу, налагодження та вирішення проблеми, відстежувати тенденції та зміни в системі, щодо якої здійснюється моніторинг [125].

Моніторинг з використанням Prometheus зазвичай стосується подій, до яких відносяться HTTP-запити, надсилання відповіді, читання з диска, вхід користувача. Моніторинг системи може включати профілювання, журналювання, трасування, показники, попередження та візуалізацію. Для отримання необхідних показників Prometheus здійснює сканування, надсилаючи HTTP-запити. Кожне сканування зчитує кінцеву точку HTTP /metrics, щоб отримати поточний стан метрик клієнта та зберігає значення в базі даних часових рядів Prometheus. Якщо програми надають відповіді щодо показників у форматі, відмінному від Prometheus, застосовуються так звані експортери, які отримують запити від сервера Prometheus, відповідно до них збирають дані з журналів доступу, журналів помилок програми, щодо якої здійснюється моніторинг, далі перетворює їх у необхідний формат та повертає на сервер Prometheus [125].

При виявленні проблемних ситуацій система Prometheus надсилає за допомогою свого модуля Alertmanager оповіщення відповідальним особам. Можливе використання для сповіщень каналів інтеграції з електронною поштою, Slack, Hipchat і PagerDuty, при чому Alertmanager також може виконувати мовчання або агрегацію, щоб зменшити кількість сповіщень [125].

Система PagerDuty представляє собою програмне забезпечення для організації керування інцидентами, яке дозволяє автоматизувати виявлення проблем, здійснювати реагування та їх вирішення [126].

Важливим елементом функціонування системи Prometheus є необхідність візуалізації зібраної моніторингової інформації. Хоча Prometheus містить спеціальний браузер виразів, який може бути використаний для побудови в тому числі аналітичних запитів, найкращим доступним інструментом для візуалізації є Графана. Система Grafana має можливості інтеграції з Prometheus та створення різноманітних інформаційних панелей. Для цього необхідно налаштувати Prometheus як джерело даних для системи Grafana [125].

Для відслідковування функціонування програмного забезпечення цифрового двійника необхідно використовувати спеціалізовану систему ведення та аналізу технічних журналів. В результаті аналізу можливих альтернатив для цифрового двійника НБК рекомендується використання стеку систем ELK, до якого входять Elasticsearch, Logstash та Kibana. Стек ELK, що часто називається Elasticsearch, надає можливість збирати журнали ваших систем і програм, аналізувати їх і створювати візуалізації, щоб моніторити програми та інфраструктури, швидше усувати проблеми, аналізувати систему безпеки та багато іншого. Це розподілений пошуковий та аналітичний двигун на базі Apache Lucene. Він є ідеальним інструментом для різних прикладів використання аналітики журналів та пошуку завдяки підтримці різних мов, високої продуктивності та документам JSON без схем [127].

Інструмент Logstash дозволяє збирати дані з різних джерел, перетворювати їх та відправляти у потрібне місце призначення. Завдяки вбудованим фільтрам і підтримці більше 200 модулів, що підключаються, Logstash забезпечує користувачам простий доступ до даних незалежно від їх джерела або типу. Його відкритий код дає перевагу в питанні гарантування безпеки даних від стороннього втручання, що є важливим для інформаційних систем НБК [127].

Для візуалізації та аналіз зібраних даних до стеку входить інструмент Kibana, який пропонує прості у використанні інтерактивні діаграми, вбудовані агрегатори та фільтри, а також геопросторову підтримку, завдяки чому є кращим вибором для візуалізації даних, що зберігаються в Elasticsearch [127].

Таким чином, Logstash збирає, перетворює та надсилає дані в потрібний пункт призначення, Elasticsearch індексує та аналізує зібрані дані та здійснює пошук у них, а Kibana надає візуалізацію результатів аналізу. Стек ELK задовольняє потреби у сфері аналітики журналів. Коли більша частина ІТ-інфраструктури переміщується в публічні хмари, таке рішення є необхідним для аналітики та управління журналами, яке дозволить моніторити цю інфраструктуру, а також обробляти будь-які журнали серверів або програм та дані навігації. Стек ELK дає просте, але надійне рішення щодо аналізу журналів для розробників та інженерів DevOps, яке дозволяє отримати корисні висновки з діагностики збоїв, продуктивності програм та моніторингу інфраструктури [127].

З метою допомоги розробникам діагностувати, виправляти та підвищувати продуктивність програмного коду цифрового двійника доцільно використовувати платформу Sentry. Ця платформа дозволяє переглядати кілька проектів програмного забезпечення одночасно, даючи можливість виявити всі проблеми в їх організації. Наявна можливість вибору проектів, середовищ та діапазону дат. Важливо, що цей сервіс реалізує очищення конфіденційних даних перед їх надсиланням. Також він допомагає виявляти помилки, надаючи розробникам програмного продукту інформацію щодо неочікуваних помилок у конвеєрі даних. Крім того, сервіс групує типові помилки, тим самим зменшуючи кількість відправлених адміністраторам та розробникам повідомлень про помилки. Зазначене надає команді підтримки та розробникам повну інформацію, необхідну для здійснення швидшого виконання ітерацій розробки, зниження ризику помилок та створення високопродуктивного програмного забезпечення [128].

Таким чином, сформована архітектура програмного забезпечення 3D візуалізації інформації про стан НБК на основі технології мікросервісів, як одного з компонентів його цифрового двійника, обрано засоби системної інфраструктури для розгортання та функціонування як вказаного програмного забезпечення, так й цифрового двійника в цілому. Далі слід визначити структури та засоби зберігання інформації, необхідної для функціонування цього програмного забезпечення.

#### **4.3 Модель та засоби реалізації бази даних програмного забезпечення 3D візуалізації стану НБК**

Для зберігання інформації, необхідної для функціонування програмного забезпечення 3D візуалізації стану НБК розроблено моделі його даних та обрано засоби реалізації.

В базах даних сервісів зберігається інформація про величини, що вимірюються, точки вимірювання з тривимірними координатами, датчики та їх розташування, підсистеми НБК, значення датчиків в певні моменти часу. Моделі даних, необхідні для цього, було розроблено в підрозділі 3.3. Однак в підрозділі 4.1 були наведені уточнені вимоги до програмного забезпечення, в яких зазначена необхідність при відображенні значень величин здійснювати їх підсвічення різними кольорами (зелений, жовтий, червоний) в залежності від налаштованих граничних значень. Зелений колір означає, що значення в нормі, жовтий – наближається до критичного значення, червоний – аварійна ситуація. Відповідно, це вимагає доповнення структур даних цифрового двійника, представлених в підрозділі 3.3, новими складовими.

Слід врахувати, що правила підсвічування результатів вимірювання величини  $v$  з множини величин  $V$ , що характеризують стан НБК, в загальному

випадку можуть мати різні налаштування для різних точок вимірювання з множини  $P$ , де кожний елемент  $p \in P$  являє собою вектор, що складається з 3D координат розташування датчиків. Тому налаштування кольорового підсвічування величин представляються у вигляді кортежу:

$$cs = (v_i, p_k, CD_{ikj}, CV_{ikjn}), \quad (4.1)$$

де  $cs$  – кортеж з відношення налаштувань кольорового підсвічення значень величини;

$v_i$  – величина з множини  $V$ , значення якої підсвічуються;

$p_k$  – точка вимірювання, для якої задаються налаштування;

$CD_{ikj}$  – інтервал значень величини  $v_i$  в точці  $p_k$ , для якого задаються налаштування;

$CV_{ikjn}$  – значення кольору з множини {зелений, жовтий, червоний}.

Інтервал значень  $CD_{ikj}$  величини  $v_i$  в точці  $p_k$  представляється у вигляді вектору  $(CDL_{ikj}, CDR_{ikj})$ , де  $CDL_{ikj}$  – ліва границя відрізка, а  $CDR_{ikj}$  відповідно права границя. Ці значення можуть бути числовими або  $\pm\infty$ , причому завжди  $CDL_{ikj} \leq CDR_{ikj}$ .

Можливість використання даних, представлених множиною кортежів виду (4.1) визначається наступними правилами, які визначають логіку перевірки цих даних на повноту та несуперечливість.

Інтервали налаштувань по певній величині  $v_i$  в заданій точці вимірювань  $p_k$  не можуть перетинатися, що визначається формулою:

$$CD_{ikj} \cap CD_{ikl} = \emptyset \text{ для } \forall j \neq l. \quad (4.2)$$

Повинні бути задані налаштування всіх кольорів по величині  $v_i$  в заданій точці вимірювань  $p_k$ , що визначається формулою:

$$\left| \bigcup_{n=1}^3 \bigcup_j CV_{ikjn} \right| = 3 \text{ для } \forall i, k. \quad (4.3)$$

Формули (4.2), (4.3) покладені в основу перевірочних процедур обробки даних після запису інформації про налаштування відображення кольорів. Для збереження цих даних на основі формули (4.1) розроблено відношення «Межі кольорів», структура якого наведена в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Структура відношення «Межі кольорів» (ColorLimits)

№	Назва атрибуту	Опис атрибуту	Тип значень
1	V_ID	Ідентифікатор величини (номер)	Натуральне
2	Interval_ID	Ідентифікатор інтервалу	Натуральне
3	Color	Колір	Перерахування: зелений, жовтий, червоний
4	LeftBorder	Ліва границя	Число, або пусто
5	RightBorder	Права границя	Число, або пусто
6	Point_ID	Ідентифікатор точки вимірювання	Натуральне або пусто

Представлення у відношенні з таблиці 4.1 значення  $\pm\infty$  для меж інтервалів реалізовано через завдання пустого значення. Якщо не задане значення лівої



межі, то це  $-\infty$ , а якщо не задане значення правої – то відповідно  $+\infty$ . Одночасно ліва та права межа не можуть бути пустими.

В деяких випадках налаштування кольорового відображення значень величини не залежать від точки вимірювання, тому значення ідентифікатору точки вимірювання може бути пустим. В пошукових запитах спочатку відбувається пошук налаштувань для величини та точки вимірювання, і якщо вони не знайдені, то тоді пошук продовжується по рядках з даною величиною, але пустою точкою вимірювання.

Для зберігання інформації, необхідної для функціонування програмного забезпечення 3D візуалізації стану НБК обрано систему управління базами даних (СУБД). В якості можливих варіантів розглядалися СУБД для реляційних баз даних, NoSQL та Column-based системи.

Для застосування реляційних баз даних потрібно чітко визначену структуру таблиць та зв'язків між ними у вигляді ключів, налаштованих індексів та обмежень, тобто інформація має бути добре структурованою. Такий тип СУБД використовує мову запитів SQL. Реляційні СУБД надають гарантії виконання ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability), що визначає їх перевагу в забезпеченні цілісності даних. Однак масштабування реляційних баз даних при зростанні обсягу даних в умовах високої завантаженості є складним, потребує висококваліфікованих фахівців. Внесення змін до структур даних є достатньо складним й може потребувати оновлення всіх даних. Таким чином, реляційні СУБД добре себе показали в транзакційних системах, в яких важливою є цілісність даних. Серед реляційних СУБД величезну популярність отримала PostgreSQL, яка вдало поєднує можливості реляційної та об'єктної бази даних. За оцінками багатьох експертів PostgreSQL є найпросунутішою у світі СУБД в цьому класі. Система підтримує безліч типів даних, в тому числі числові, строкові, мережеві адреси, документи JSON та певні унікальні типи. СУБД PostgreSQL має відкритий програмний код та розповсюджується безкоштовно [129].

Бази даних типу NoSQL є набагато гнучкішими, тому що кожний запис може мати різні атрибути. Для обробки інформації бази даних NoSQL можуть використовувати різні мови запитів чи навіть можуть застосовувати з метою доступу до даних API. Завдяки таким архітектурним підходам СУБД NoSQL мають кращі можливості для горизонтального масштабування під час обробки великого обсягу інформації та значного навантаження, коли кілька незалежних обчислювальних систем з'єднуються разом та кожна з них обробляє тільки певну частину запитів. Для підвищення продуктивності та полегшення доступності деякі NoSQL системи не реалізують гарантії ACID [130].

Бази даних NoSQL поділяються на чотири класи:

- бази даних виду “ключ-значення”;
- документоорієнтовані бази даних;
- графові бази даних;
- bigtable-подібні бази даних.

Зазначені класи типів NoSQL баз даних відрізняються моделями даних, підходом до реалізації розподіленості і реплікації, на чому базується їх можливість найкраще підходити для використання в тих чи інших видах завдань з розробки інформаційних технологій [130].

До переваг баз даних NoSQL слід віднести відсутність використання мови структурованих запитів SQL, що суттєво спрощує її застосування й зменшує кількість помилок навіть у не дуже досвідчених розробників. Однак в той же час SQL є певним стандартом, яким володіють багато фахівців, тому знайти персонал для супроводу доволі специфічної програмної системи на основі NoSQL є досить складним завданням [130].

Серед NoSQL СУБД найпопулярнішою є система MongoDB, яка є гнучким та зручним інструментом для створення сучасних інноваційних програмних продуктів, що швидко працюють та є масштабованими. На відміну від жорстких конструкцій реляційних баз даних, MongoDB зберігає інформацію у вигляді

документів, подібних JSON, які також мають свою структуру та ієрархію, але не таку жорстку [131]. Слід зазначити, що СУБД MongoDB ефективно використовуються в обробці великих даних та зберіганні документів, завдяки хорошему Batch processing система добре працює в умовах великої кількості даних, що швидко оновлюються, тому це робить доцільним її застосування в відповідних задачах та модулях цифрового двійника НБК.

Системи баз даних Column-based подібно реляційній моделі мають жорстку структуру кожної таблиці, але на відміну від неї дані в них зберігаються та обробляються у вигляді стовпців, що надає важливі переваги для реалізації певних операцій та завдань. Наприклад, оскільки дані по атрибуту зберігаються окремо, це дає змогу ефективно виконувати операції агрегування (наприклад, розрахунок суми, середнього й т.п.). Також у column-based системах доволі часто застосовується стиснення даних з метою зменшення обсягу збережених даних, що відповідно зменшує технічні вимоги до серверу та підвищує продуктивність обробки інформації. Тому дуже часто Column-based системи застосовуються в програмних продуктах для вирішення аналітичних завдань, де є потреба швидко отримувати підсумкові дані. Слід зазначити, що column-based системи по аналогії з NoSQL системами також добре масштабуються горизонтально, що дозволяє їм обробляти великі обсяги даних та справлятися з високим навантаженням. Однак зазначені системи не зовсім підходять для використання у транзакційних системах, де дуже важливою є цілісність даних. Таким чином Column-based бази даних дають можливість ефективно вирішувати задачі, пов'язані з аналітикою великих даних, але в цілому вони не є універсальним рішенням й тому потрібно враховувати їх обмеження та вимоги. Однією з найбільш цікавих column-based систем на ринку є СУБД ClickHouse, яка має відкритий програмний код [132]. Також цікавим для використання в цифровому двійнику НБК набір інструментів системи Victoria metrics, яка є українською розробкою та пропонує засоби для збереження у вигляді часових рядів даних, отриманих з датчиків [133].

Таким чином, кожен з розглянутих типів СУБД, кожен з них може бути використаний в межах мікросервісної архітектури цифрового двійника для вирішення відповідних задач. Враховуючи великі обсяги даних щодо стану НБК, для управління такими базами даних рекомендується використовувати Column-based системи, які за рахунок представлення інформації у вигляді стовпців забезпечують її більш ефективну обробку.

Однак для створення прототипу програмного модуля 3D візуалізації стану НБК можна використовувати й реляційну модель під управлінням системи PostgreSQL, яка є ефективною для структурованих даних та є безкоштовною [5].

#### **4.4 Результати 3D моделювання стану НБК**

Спираючись на розроблену архітектуру програмного забезпечення та структур даних, реалізовано прототип програмного продукту для 3D візуалізації стану НБК. Розробка цього прототипу складалася зі створення цифрової геометричної 3D моделі споруди НБК та ОУ, та розробки програмного продукту для візуалізації на цій моделі даних щодо стану НБК.

Цифрова геометрична модель споруди НБК та ОУ була розроблена з використанням програмного комплексу ArchiCAD, який є системою автоматизованого проектування для інформаційного моделювання будівель, що англійською перекладається як Building Information Modeling (BIM). Відповідно до цієї технології модель об'єкту, що проектується, складається з моделей реальних будівельних конструкцій. Система ArchiCAD є одним з лідерів на ринку продуктів для BIM, має досить багато функцій для візуалізації та потужну бібліотеку компонентів, дозволяє організувати спільну роботу різних виконавців над одним проектом. Цей програмний продукт надає всі необхідні інструменти

для створення фотореалістичних 3D зображень споруд: прозорість, текстури, відбиття, змішування світла від різних джерел та «м'які» тіні [134].

З допомогою системи ArchiCAD було розроблено модель НБК в форматі ifc, в якій закладено можливість виводити інформацію щодо значень датчиків в певних точках вимірювання з прив'язкою до тривимірних координат. На рисунках 4.5 та 4.6 наведено представлення прив'язки координат розташування датчиків до будівельних конструкцій НБК у горизонтальній та вертикальній площині [13].

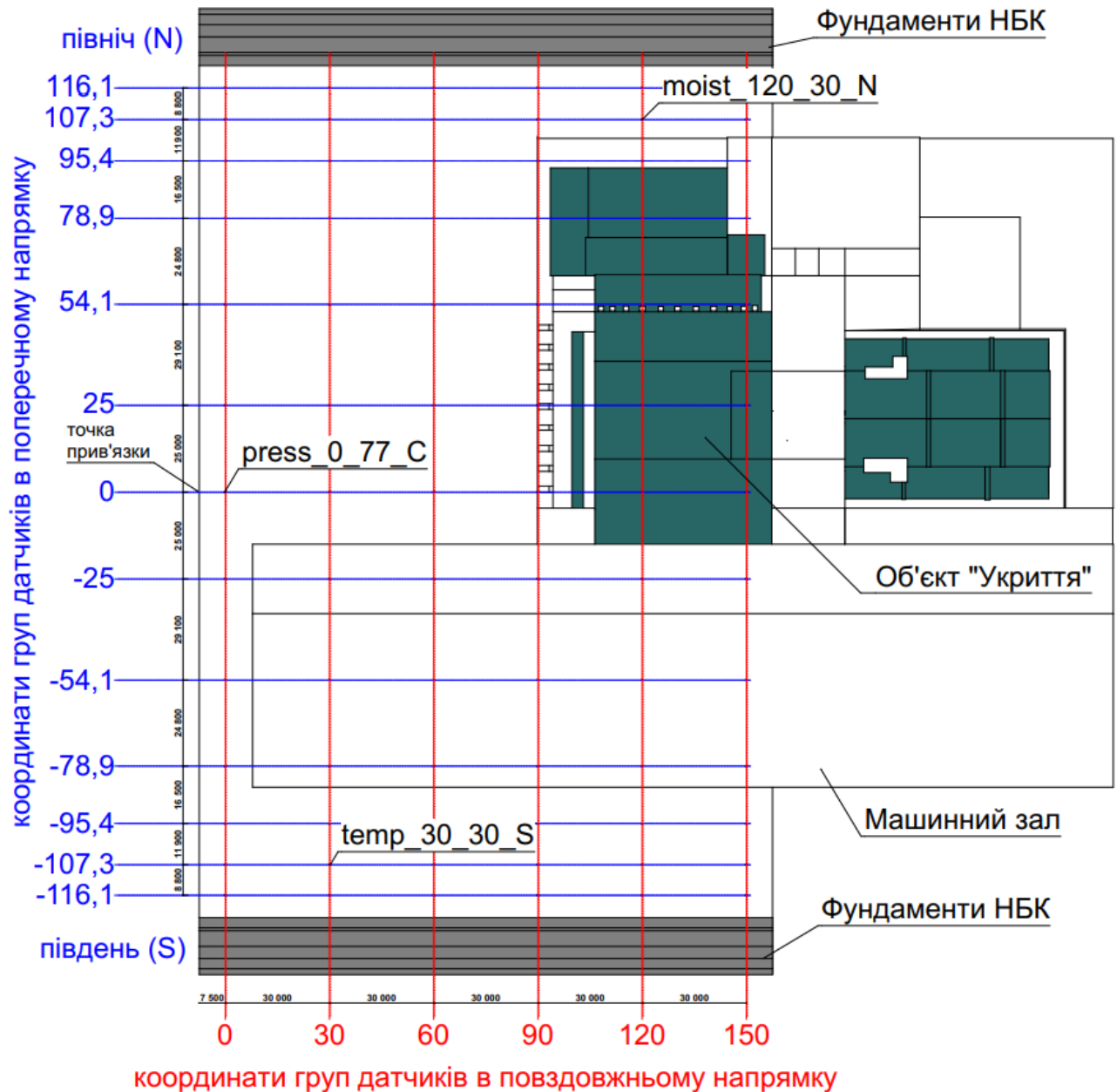


Рис. 4.5. 3D координатна система НБК в горизонтальній площині

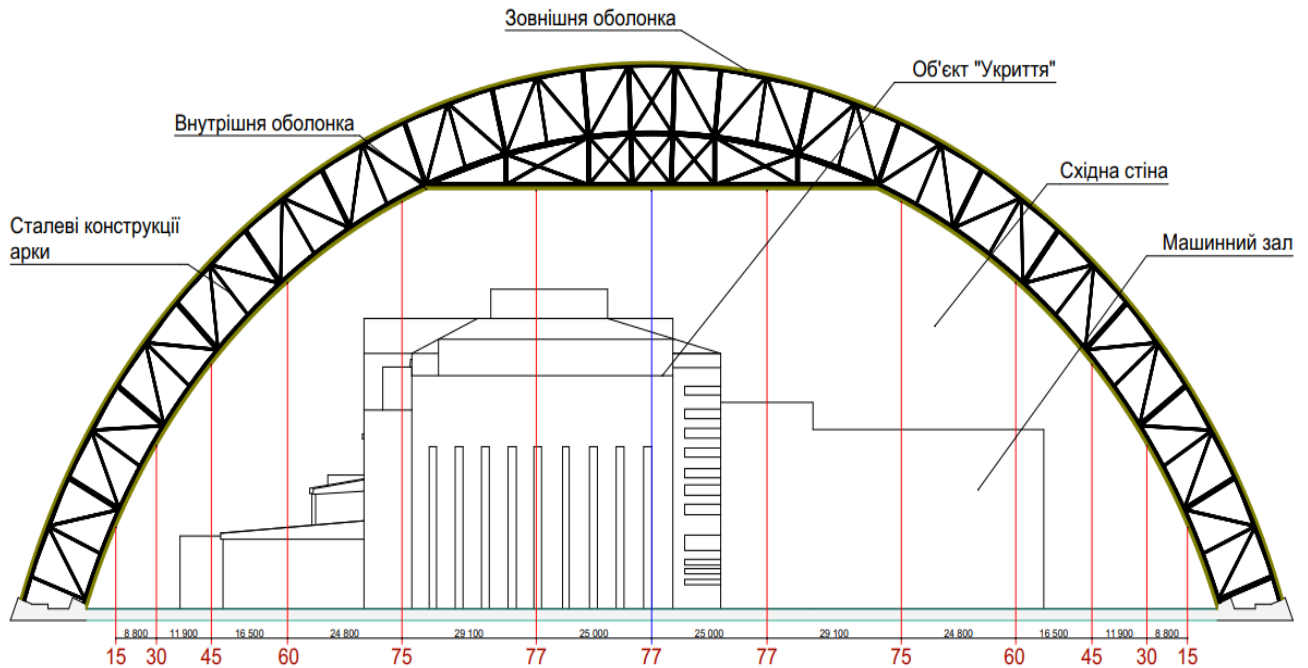


Рис. 4.6. 3D координатна система НБК в вертикальній площині

Загальний вид 3D моделі споруд НБК та ОУ наведено на рисунку 4.7.

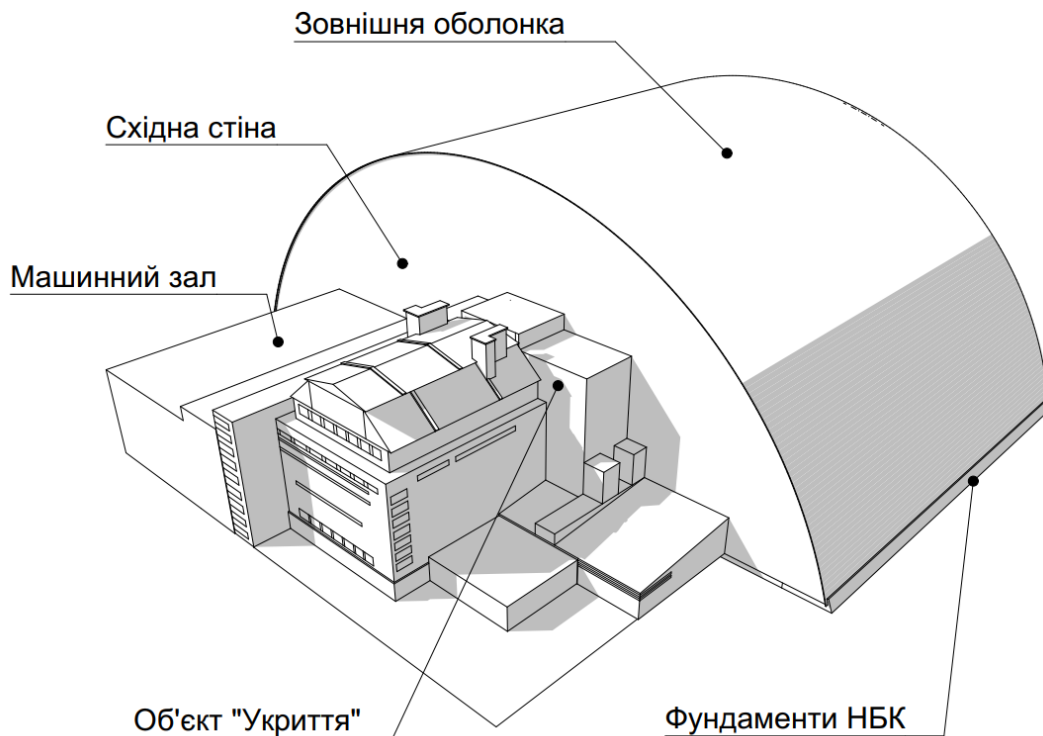


Рис. 4.7. Загальний вид 3D моделі споруд НБК та ОУ

На основі цієї цифрової геометричної 3D моделі з використанням мови програмування Python, яка має потужну базу необхідних бібліотек, розроблене програмне забезпечення для візуалізації стану НБК. На рисунка 4.8 та 4.9 наведено приклади візуалізації будівельних конструкцій НБК та виводу інформації про його стан.

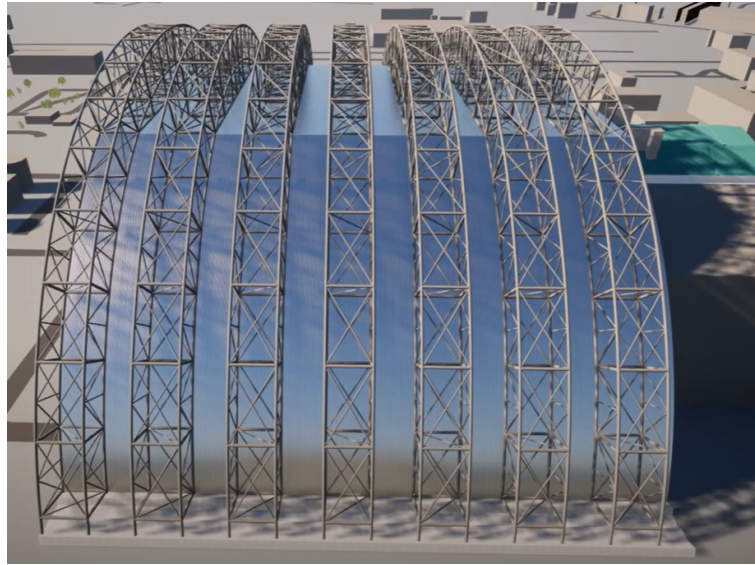


Рис. 4.8. 3D візуалізація будівельних конструкцій НБК

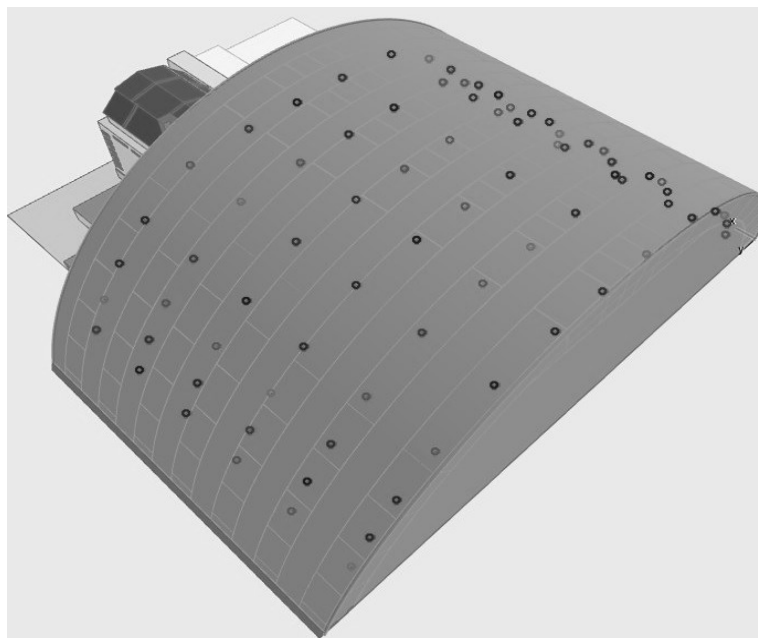


Рис. 4.9. Приклад 3D візуалізації стану НБК

Програмне забезпечення використовує цифрову геометричну модель НБК та ОУ в форматі IFC для виводу значень величин з бази даних, що дозволяє реалізувати 3D візуалізацію стану НБК як для фактичних, так і прогнозних даних. Лістинг розробленого програмного забезпечення наведено в додатках.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Сформовано функціональні та нефункціональні вимоги до програмного забезпечення для 3D візуалізації інформації про стан НБК, які визначили користувачів системи та необхідні їм функції. Враховуючи обмежені терміни виконання дисертаційного дослідження та потребу в великій команді фахівців для реалізації цих вимог зазначено, що в даній роботі буде створено лише прототип програмного забезпечення для 3D візуалізації інформації про стан НБК з обмеженим набором функцій з метою демонстрації потенційним користувачам його можливостей.

2. На основі сформованих вимог архітектура програмного забезпечення для 3D візуалізації інформації як складової цифрового двійника НБК, яка на відміну від існуючих побудована на основі технології мікросервісів з використанням цифрових геометричних моделей НБК та ОУ. Застосування технології мікросервісів забезпечує гнучкість розробленої архітектури, можливість її масштабування та подальшого розвитку впродовж всього довгого періоду експлуатації НБК як складової його цифрового двійника. Обґрунтовано вибір сучасних інформаційних систем для створення ІТ-інфраструктури з метою забезпечення функціонування, моніторингу та розвитку зазначеного програмного забезпечення та цифрового двійника НБК в цілому.

3. Для зберігання інформації, необхідної для функціонування програмного забезпечення 3D візуалізації стану НБК розроблено моделі його даних. Вказане



програмне забезпечення використовує модель бази даних, яка розроблена в розділі 3, та у зв'язку з деталізацією функціональних вимог доповнена відношенням для зберігання налаштувань кольорової підсвітки значень величин. Проведено порівняльний аналіз можливостей реляційних, NoSQL та Column-based СУБД для фізичної реалізації бази даних. Зазначено, що в межах мікросервісної архітектури під час реалізації модулів цифрового двійника може бути використано СУБД кожного типу в залежності від специфіки задач, які ці модулі вирішують. Враховуючи, що візуалізація стану НБК потребує збереження великих обсягів даних про виміряні значення величин, рекомендовано в цій задачі використовувати Column-based СУБД, однак при створенні прототипу цього програмного забезпечення раціонально застосувати сучасну реляційно-об'єктну СУБД PostgreSQL.

4. Для моделювання будівельних конструкцій НБК та ОУ розроблено цифрову геометричну 3D модель в системі ArchiCAD з можливістю відображення даних в певних точках в системі тривимірних координат. Розроблено програмне забезпечення з використанням мови програмування Python для відображення на основі цієї цифрової геометричної 3D моделі інформації про стан НБК з його бази даних. Зазначене програмне забезпечення є прототипом програмного модуля 3D візуалізації інформації про стан НБК.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання даного дисертаційного дослідження вирішено актуальне наукове завдання з розробки архітектури, методу і програмного забезпечення обробки даних цифрового двійника НБК ЧАЕС. Зазначене наукове завдання має істотне значення для теоретичних основ розробки та удосконалення програмного і алгоритмічного забезпечення для аналізу, прогнозування та управління процесами НБК. Враховуючи унікальність та тривалий плановий термін експлуатації НБК, необхідність належного захисту населення та довкілля від радіаційної небезпеки, та беручи до уваги відсутність аналогічних рішень, можна зробити висновок про високу важливість та пріоритетність результатів дослідження.

В дисертаційному дослідженні отримані наступні основні результати:

1. Проведено аналіз призначення, функціональних можливостей, архітектури та основних характеристик існуючих інформаційних систем управління та обробки даних НБК, що дозволило визначити обрис його цифрового двійника.

2. Дослідження сучасних підходів до обробки даних при моделюванні та управлінні процесами НБК показало, що наявні моделі, які дозволяють прогнозувати та оцінювати його різні характеристики, не утворюють єдиної інтегрованої системи моделювання. Виявлено потребу в автоматизації управління вентиляційними системами НБК в умовах нестаціонарних термогазодинамічних процесів, необхідність реалізації 3D візуалізації інформації для покращання можливостей аналізу стану НБК та забезпечення підтримки прийняття рішень, що визначило основні функціональні вимоги до цифрового двійника.

3. Огляд концепції цифрових двійників дозволив визначити їх основні види й напрями застосування. Наявні програмні продукти для побудови цифрових двійників не враховують в повній мірі специфіку НБК як унікальної великої та

складної системи. Спираючись на ці результати, сформовано підходи до кластерної побудови архітектури цифрового двійника НБК.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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 моделях не перевищує 2.5% та 3.2%, що свідчить про їх адекватність та можливість практичного застосування.

8. Мета дослідження щодо 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 досягнута та всі поставлені часткові завдання

вирішені повністю. 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.

9. Практичне використання результатів роботи 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».

10. 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.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Loboda P.P., Starovit I.S. Architecture of the digital twin for the New safe confinement of the CHNPP. *Зв'язок*. 2022. №2. С. 22-26.
2. Лобода П.П., Старовіт І.С. Моделювання та управління процесами Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС на основі технології цифрових двійників. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Технічні науки*. 2023. №2(85). С. 168-173.
3. Лобода П.П., Старовіт І.С. Модель бази даних та знань цифрового двійника Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Computer Science and Applied Mathematic*. 2022. №2. С. 50-57.
4. Лобода П.П., Старовіт І.С. Розробка архітектури програмного забезпечення прогнозування і управління термогазодинамічними процесами і радіаційним станом Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Технічні науки*. 2022. №4(83). С. 67-73.
5. Loboda P.P. 3D visualization of the state of the new secure confinement of CHNPP using microservice architecture. *Зв'язок*. 2023. №3. С. 29-33.
6. Loboda P.P., Koval O.B. Construction of the digital twin architecture for the New Safe Confinement of the CHNPP. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. У 2-х т. : Матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ. (присвячена 125-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського та 90-річчю НН ІАТЕ (ТЕФ)), м. Київ, 25–28 квіт.2023 р. / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка» Київ, 2023. Т. 2. С. 114 – 115.*
7. Petro Loboda, Ivan Starovit. Data formalization of the digital twin for the New Safe Confinement of the CHNPP. *Новітні технологічні тенденції інтелектуальної індустрії та Інтернету речей. : Матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. «ТТСПТ-2023», м. Київ, 24–25 січня 2023 р. / КНУБА Київ, 2023. С. 15 – 19.*

8. Коваль О.В., Гаврилко Є.В., Лобода П.П., Старовіт І.С. Структура бази даних та знань цифрового двійника Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Інформаційні технології та інженерія* : Матеріали всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів, м. Миколаїв, 7–10 лютого 2023 р. / ЧНУ імені Петра Могили. Миколаїв, 2023. С. 100 – 101.

9. Лобода П.П. Програмне забезпечення цифрового двійника для підготовки персоналу Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Результативність критичної інфраструктури – 2023* : Матеріали наук.-практ. конф., м. Київ, 21 червня 2023 р. / ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України Київ, 2023. С. 100 – 101.

10. Лобода П.П., Старовіт І.С., Коваль О.В., Гаврилко Є.В., Шушура О.М. Технологія цифрових двійників в задачах управління процесами Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Technologies and strategies for the implementation of scientific achievements* : collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the II International Scientific and Theoretical Conference, November 18, 2022. Stockholm, Kingdom of Sweden: European Scientific Platform, 2022. PP. 103 – 105.

11. Старовіт І.С., Лобода П.П., Гаврилко Є.В. Оптимізація роботи вентиляційних установок НБК ЧАЕС при змінних граничних умовах. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. У 2-х т.* : Матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ. (присвячена 125-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського та 90-річчю НН ІАТЕ (ТЕФ)), м. Київ, 25–28 квіт.2023 р. / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка» Київ, 2023. Т. 2. С. 111 – 112.

12. Старовіт І.С., Лобода П.П., Гаврилко Є.В., Шушура О.М. Нейро-нечітке управління вентиляцією нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *X Всеукр. наук.-практ. конф. здобув. вищої освіти та молод. вчених з автоматичного управління* : тези доп., 12 квіт.2023, Херсон – Хмельницький / редкол.: Рудакова Г.В. та ін. Херсон – Хмельницький, 2023. С. 57 – 59.

13. Лобода П.П. 3D візуалізація стану нового безпечного конфайнменту

ЧАЕС на основі мікросервісної архітектури. *Achievements of 21st Century Scientific Community* : Матеріали I міжнародної наук.-практ. конф., м. Дніпро, 14-15 вересня 2023 р. / Мареніченко В.В. Дніпро, 2023. С. 282 – 284.

14. Носовський А. В. Про стан та перспективи науково-технічного супроводу з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. *Вісник Національної академії наук України*. Київ. 2017. № 4. С. 13 – 21.

15. Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему: Закон України від 11.12.1998р. №309-XIV : станом на 01.01.2015р. *Відомості Верховної Ради України*. 1999. № 4. С. 33.

16. Про загальнодержавну програму зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему: Закон України від 15.01.2009р. № 886-VI станом на 01.01.2019р. Верховна Рада України; Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/886-17#Text> (дата звернення 04.10.2022).

17. Стельмах Д. А., Свєрчков С. Ф., Шумилова Л. Є., Дилдін В. Ю. Аналіз необхідності актуалізації стратегії перетворення об'єкта «Укриття». *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. Київ. 2016. Вип. 27. С. 35 – 42.

18. Деренговський В. В., Скітер І. С. Трирівнева модель оцінки потенційних сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему на основі глобального факторально-індикаторного критерію. *Ядерна енергетика та довкілля*. № 1 (23) 2022. ISSN 2311-8253. С45-55.

19. Новый безопасный конфайнмент Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации): монография/ Круковский П.Г., Метель М.А., Складенко Д.И. и др.; за ред. П.Г. Круковского, В.А. Краснова, В.П. Сулимова/ Киев: ООО "Франко Пак", 2019. ISBN 978-966-97864-7-0.300с.

20. Об'єкт «Укриття»: 30 років після аварії: монографія / В. О. Краснов, А.

В. Носовський, В. М. Рудько, В. М. Щербін; НАН України, Ін-т проблем безпеки АЕС. – Чорнобиль (Київ. обл.): Інститут проблем безпеки АЕС, 2016. ISBN 978-966-02-7875-2. 512 с.

21. Краснов В. О., Носовський А. В., Паскевич С. А., Рудько В. М. Об'єкт «Укриття» в умовах нового безпечного конфайнмента (за заг. ред. А. В. Носовського) – Чорнобиль : ІПБ АЕС НАН України, 2021. ISBN 978–966–02–9577–3. 344 с.

22. Батій В. Г., Паскевич С. А., Рудько В. М. Майбутнє об'єкта «Укриття» після створення Арки. *Проблеми Чорнобильської зони відчуження*. 2016. Вип. 15–16. С. 4 – 13.

23. Интегрированная автоматизированная система контроля объекта «Укрытие». Оценка безопасности (заключительная). 2016.

24. Сверчков С. Ф. Интегрированная автоматизированная система контроля объекта «УКРЫТИЕ». *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2019 вип. 32. ISSN 1813-3584. С.62–66.

25. Новый безопасный конфаймент. Интегрированная система управления. Проект ИСУ. Пояснительная записка: (Отчет) / СП НОВАРКА. – SIP-N-AC-22-B2172- TEN-200-01.

26. Круковский П., Полубинский А., Канчуковский П., Складенко Д., Тадля О., Дейнеко А., Хуторный В. Разработка мониторинга состояния нового безопасного конфайнмента на основе CFD-модели (для поддержки проекта преобразования объекта «Укрытие»). *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECO 18): збірник матеріалів III Міжнародної конференції (25-27 квітня 2018 року, м. Славутич). / Чернігів, ЧНТУ. 2018. ISBN 978-617-7571-44-4. С.165-171.*

27. Вдосконалення системи моніторингу термогазодинамічного і радіаційного стану нового безпечного конфайнмента та об'єкта укриття щодо їх впливу на персонал і довкілля: (Звіт по НДР) / ІТТФ НАН України. – 01.04.2016



р. № К-5-38/2016. 2016. С.22.

28. Метель М., Круковский П., Скляренко Д., Полубинский А., Олейник В. CFD-моделирование влажностного и радиационного состояния нового безопасного конфайнмента (анализ и прогнозирование). *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECO 18): збірник матеріалів III Міжнародної конференції (25-27 квітня 2018 року, м. Славутич).* / Чернігів, ЧНТУ. 2018. ISBN 978-617-7571-44-4. С.215-217.

29. Центр візуалізації ЧАЕС URL: <https://www.youtube.com/watch?v=txnoidoZzEk>. (дата звернення: 14.09.2022).

30. Bernd Kratz, Florian Wieduwilt, Maxim Saveliev. 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. Selected Papers of 16th International Scientific-practical Conference. MODS. 2021 June 28–July 01. Chernihiv, Ukraine P.43 – 57.

31. Батій В. Г., Підберезний С. С., Рудько В. М., Щербін В. М. Комп'ютерне моделювання при експлуатації та перетворенні об'єкта «Укриття» . *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2016. Вип. 27. С. 67 – 79.

32. Єгоров В.В., Морозов Ю. В., Павловський Л. І., Холодюк А. О. Зміна радіаційних умов на об'єкті “Укриття” після встановлення арочної конструкції у проектне положення. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2007. Вип.7. С. 85 – 90.

33. Батій В.Г., Щербін В. Н., Щулепникова А. В. Анализ возможных путей обращения с топливосодержащими материалами после завершения строительства Нового безопасного конфайнмента . *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2014. Вип. 23. С. 32 – 44.

34. Ключников А. А., Рудько В. М., Батий В. Г., Павловский Л. И., Подберезный С. С. Компьютерное моделирование процессов и зон производства

работ на объекте "Укрытие. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля.* 2004. Вип.1. С. 51 – 58.

35. Батій Є.В., В. Т. Котляров. Математичне моделювання дозових навантажень при пересуванні в неоднорідних радіаційних полях. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля.* 2006. Вип.6. С. 120 –124.

36. Батий В. Г., Подберезный С. С., Стоянов А. И. Объемное распределение полей гамма-излучения в зоне Центрального зала 4-го энергоблока ЧАЭС. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля.* 2014. Вип.23. С. 66–73.

37. P.G. Krukovskyi , Ye.V. Diadiushko, V.O. Garin, O.V. Tryfonov, Yu.Yu. Kabanov. CFD model as a digital twin of the radiation state of the new safe confinement of the Chernobyl NPP. *Problems of Atomic Science and Technology.* ISSN 1562-6016. PAST. 2020. №4(128), P. 54 – 62.

38. Круковський П.Г., Склярєнко Д.І., Дядюшко Є.В., Кондратенко С.О. Аналіз неорганізованого повітрообміну Нового Безпечного Конфайнменту з оточуючим середовищем (попередні результати моделювання за експлуатаційними даними). *V Міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища»/ INUDECО.* 27–29 квітня 2020 р., м. Славутич, Україна. 2020. С.109 – 117.

39. Круковский П., Склярєнко Д., Метель М., Олейник В., Дядюшко Е. CFD-аналіз і прогнозування розповсюдження радіоактивних аерозолів всередині і за межі нового безпечного конфайнменту при перетворенні об'єкта укриття в екологічно безпечну систему. *Труды между. конференции «Проблемы снятия с эксплуатации объектов ядерной энергетики и восстановления окружающей среды»/ INUDECО.* 2019, 25–27 апреля 2019 г. г. Славутич, Украина. 2019. С. 129–133.

40. P.G. Krukovskyi, E.V. Dyadyushko, D.I. Sklyarenko, I.S. Starovit.

Unorganized emissions of air with radioactive aerosols from the new safe confinement of the Chernobyl Nuclear Power Plant into the surrounding environment. *Issues of atomic science and technology*. 2021. No. 6. P. 181–186. DOI:10.46813/2021-136-181.

41. Pysmennyy, Y., Havrylko, Y., Krukovskyi, P., Starovit, I., Diadiushko, Y. (2022). Development of special mathematical software for controlling the ventilation units of the new safe confinement of the ChNPP. *Nuclear & radiationsafety*. 2(94). 2022. P. 35-43. DOI: 10.32918/nrs.2022.2(94).04.

42. Круковский П.Г., Метель М.А., Дейнеко А.И., Скляренко Д.И. Анализ и прогнозирование переноса радиоактивной пыли при эксплуатации Нового Безопасного Конфайнмента ЧАЭС. *Пром. теплотехника*. 2018. Т.40. №4. С. 65–70.

43. Deme S., Jánosy J. S., Láng E., Szabó I. C. Radionuclide dispersion calculation in environmental radiation monitoring system of the Paks NPP. 2003. Jul 01. URL: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20658881> (дата звернення 02.10.2022).

44. Батій В.Г., Сізов А. О., Федорченко Д. В., Холодюк А. О. Динаміка зміни концентрації радіоактивних аерозолів під час вилучення паливовміщуючих матеріалів з об'єкта "Укриття". *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. Вип. 4. С. 41– 44.

45. Батий В. Г., Егоров В. В., Рубежанский Ю. И. Расчет концентрации радиоактивных аэрозолей при выбросах из Нового безопасного конфайнмента ЧАЭС. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2008. Вип.9. С. 78-85.

46. Вдосконалення системи моніторингу термогазодинамічного і радіаційного стану нового безпечного конфайнмента та об'єкта укриття щодо їх впливу на персонал і довкілля: (Звіт по НДР) / ІТТФ НАН України. – 01.04.2016 р. № К-5-38/2016. 2016. С.22. (Ukr).

47. Круковский П.Г., Метель М.М., Полубинский А.С., Краснов В.А.,

Скляренко Д.И., Дейнеко А.И. Модель теплогазодинамического, влажностного и радиационного состояния Нового Безопасного Конфайнмента и Объекта "Укрытие" (для поддержки проекта преобразования объекта «Укрытие»)/ INUDECO: матеріали 2-ї міжнародної наук.-практ. конф., 25–27 квіт. 2017 р., м. Славутич. 2017. С.347–350.

48. What is a digital twin? URL: <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin> (дата звернення: 04.09.2022).

49. Saddik A. El. Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies. IEEE MultiMedia. 2018. vol. 25, no. 2. Apr.- Jun. 2018. P. 87-92. DOI: 10.1109/MMUL.2018.023121167.

50. Сулема Є. С. Методи, моделі та засоби обробки мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів: дис. ... д-ра техн.наук: 01.05.03. НТУУ «КПІ Ігоря Сікорського», Київ. 2020. 343 с.

51. Цифровой двойник: зачем создавать в виртуальной среде симуляторы деталей, двигателей и целых цехов. URL: <https://cheremuha.com/2018/04/13/digital-twin.html> (дата звернення: 14.01.2023).

52. 6 лучших программ и платформ цифровых двойников (2022 г.) – HashDork URL: <https://hashdork.com/ru/digital-twin-software> (дата звернення 14.01.2023).

53. Hermann M., Pentek T., and Otto B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. 2016. P. 3928–3937. DOI: 10.1109/HICSS. 2016. 488.

54. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. Springer, 2017. P. 85 – 113.

55. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. P. 175 – 200.

56. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, Issue 11. P. 1016 –1022.
57. Uhlenkamp J., Hribernik K. A., and Wellsandt, S.. A first systemization of their dimensions. *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. no. October, 2019 DOI: 10.1109/ICE.2019.8792579.
58. Tekinerdogan B., Verdouw C. Systems Architecture Design Pattern Catalog for Developing Digital Twins. no. September, 2020. 5103 DOI: 10.3390/s20185103.
59. Madni Azat M., Madni C., Scott D. Lusero Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 2019. No 7. 30 January 2019 P. 1 – 13.
60. Pronost G., Mayer F., Marche B., Camargo M., Dupont L. Towards a Framework for the Classification of Digital Twins and their Applications. *2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Cardiff, United Kingdom, 2021. P. 1–7. DOI:10.1109/ICE/ITMC52061.2021.9570114.
61. U.S. Air Force. (2013). Global Horizons Final Report: United States Air Force Global Science and Technology Vision. AF/ST TR 13-01, United States Air Force. URL: <https://www.hsdl.org/?view&did=741377> (дата звернення: 04.06.2023).
62. Bartalský L., Rovny O., Šišmišová D., Morhč M., Lokšík M. The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept. *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*. 2017. P. 258 – 262. DOI: 10.1109/PC.2017.7976223.
63. Wagner C., Grothoff J., Epple U., Drath R., Malakuti S., Grüner S., Hoffmeister M., Zimmermann P. The role of the Industry 4. 0 asset administration shell and the digital twin during the life cycle of a plant. *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2017. P. 1–8.
64. Mabkhot M. M., Al-Ahmari A. M., Salah B., Alkhalefah H. Requirements of the smart factory system: A survey and perspective. *Machines*, vol. 6, no. 2. 2018. P.

23.

65. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 29 (2020). P. 36-52. DOI:10.1016/j.cirpj.2020.02.002

66. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems* .2017. P. 85–113.

67. H. Zhang, G. Zhang, Q. Yan. Dynamic resource allocation optimization for digital twin-driven smart shopfloor. *2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. 2018. P. 1–5.

68. Gabor T., Belzner L., Kiermeier M., Beck M.T., Neitz A. A simulation-based architecture for smart cyber-physical systems. *2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing, ICAC*. 2016. P. 374-379. DOI: 10.1109/ICAC.2016.29.

69. Adamenko D., Kunnen S., Nagarajah A. Digital twin and product lifecycle management: What is the difference? Product Lifecycle Management Enabling Smart X. *Springer International Publishing*. Cham. 2020. P. 150-162. DOI: 10.1007/978-3-030-62807-9\_13.

70. Barricelli B. R., Casiraghi E., and Fogli D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*. vol. 7. P. 1. 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.

71. Angira Sharma , Edward Kosasih , Jie Zhang , Alexandra Brintrup , Anisoara Calinescu. Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration*. Volume 30. November 2022. 100383. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383/>

72. Perin Ünal. Cognitive Digital Twins: Digital Twins That Learn By Themselves, Foresee the Future, and Act Accordingly. 13.09.2022. URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org/2022/09/cognitive-digital-twins-digital-twins-that-learn-by-themselves-foresee-the-future-and-act-accordingly/> (дата звернення:

02.10.2022).

73. Yanjun Shi, Weiming Shen, Lihui Wang, Francesco Longo, Letizia Nicoletti, Antonio Padovano . A Cognitive Digital Twins Framework for Human-Robot Collaboration. *Procedia Computer Science Volume 200*. 2022. P. 1867-1874. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.387> (дата звернення: 04.01.2023).

74. Microsoft Azure Digital Twins. URL: <https://azure.microsoft.com/enus/services/digital-twins/> (дата звернення: 06.09.2022).

75. Data Lake. URL: <https://azure.microsoft.com/en-us/solutions/data-lake> (дата звернення: 06.09.2022).

76. Understand digital twins and their twin graph. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/concepts-twins-graph> (дата звернення: 06.09.2022).

77. Seebo Digital Twin Software. URL: <https://www.seebo.com/predictive-quality-yield-solution/> (дата звернення: 06.09.2022).

78. Smith J. S., Sturrock D. T., Kelton W. D. Simio and simulation: modeling, analysis, applications, Simio LLC, 2019.

79. Simio. Digital Twin. URL: <https://www.simio.com/software/simio-process-digital-twin.php> (дата звернення: 14.09.2022).

80. Roberto Saracco. Digital Twins in Industry. *EEE Future Direction*. Sept. 21. 2021. URL: <https://cmte.ieee.org/futuredirections/2021/09/21/digital-twins-in-industry/> (дата звернення: 14.09.2022)

81. What is ERP? URL: <https://dynamics.microsoft.com/ru-ru/erp/what-is-erp/> (дата звернення: 14.09.2022).

82. Simcenter simulation and test solutions. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/> (дата звернення: 16.09.2022).

83. SAP Digital Manufacturing Cloud. URL: <https://help.sap.com/viewer/c86ca4026fae4cb3ba66ed751866175b/latest/en->

US/055988415fe64a7f9d43c615ab4eda5c.html (дата звернення: 16.09.2022).

84. CosmoTech Enterprise Digital Twin Software Platform. URL: <https://cosmotech.com/software-solutions/software-solution-platform> (дата звернення: 16.09.2022).

85. STEP Tools. Digital Twin Machining. URL: [http://www.steptools.com/blog/20171011\\_twin\\_machining/](http://www.steptools.com/blog/20171011_twin_machining/) (дата звернення: 16.09.2022).

86. Autodesk. DNA for Digital Twin. April 20, 2023. URL: <https://www.autodesk.com/campaigns/digital-twin> (дата звернення: 08.06.2023).

87. SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com/> (дата звернення: 18.09.2022).

88. M. Rushton G. Peters. aPriori's Product Sustainability Software is Now Live. February 14, 2023. URL: <https://www.apriori.com/blog/aprioris-product-sustainability-software-is-now-live/> (дата звернення: 06.06.2023).

89. F. Hiss. Digital Twins: A Powerhouse to Transform Business. March 9, 2023. URL: <https://www.apriori.com/blog/digital-twins-a-powerhouse-to-transform-business/> (дата звернення 22.08.2023).

90. R. Mogensen aPriori Awarded Patent for Unique Digital Manufacturing Technology. August 11. 2021. URL: <https://www.apriori.com/press-release/apriori-awarded-patent-for-unique-digital-manufacturing-technology/> (дата звернення: 06.09.2022).

91. W. Thomas. Introducing Sentient Science's DigitalClone Technology. MARCH 15, 2013. URL: <https://sentientscience.com/resource-library/whitepapers/introducing-sentient-sciences-digitalclone-technology/> (дата звернення: 18.09.2022).

92. SPHINX OPEN – the logical digital twin platform engineered by GFT. URL: <https://www.gft.com/uk/en/technology/sphinx-open> (дата звернення: 18.09.2022).

93. NEXOSPACE European Union Trademark Information By Bosch



Sicherheitssysteme GmbH. March 24 2022. URL:  
<https://www.trademarkelite.com/europe/trademark/trademark-detail/018589834/NEXOSPACE> (дата звернення: 20.09.2022).

94. Proficy CSense URL: <https://www.ge.com/digital/applications/proficy-csense> (дата звернення 20.09.2022).

95. Operations Performance Management (OPM) for Power Generation GE Digital. URL: <https://www.ge.com/digital/applications/operations-performance-management-opm-power-generation> (дата звернення: 20.09.2022).

96. GE Digital software applications and services. URL: [www.ge.com/digital/iiot-platform](http://www.ge.com/digital/iiot-platform) (дата звернення: 20.09.2022).

97. IBM Watson IoT Platform. Product architecture. URL: <https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSQP8H/iot/overview/architecture.html> (дата звернення: 20.09.2022).

98. NoSQL Databases. URL: <https://www.ibm.com/cloud/learn/nosql-databases> (дата звернення: 24.09.2022).

99. Data Lake vs Data Warehouse. URL: <https://luminousmen.com/post/data-lakevs-data-warehouse> (дата звернення: 24.09.2022).

100. IBM Storage FlashSystem. URL: <https://www.ibm.com/cloud/learn/object-storage> (дата звернення: 24.09.2022).

101. The CloudPlugs Difference. URL: <https://cloudplugs.com/> (дата звернення: 24.09.2022).

102. What Is Digital Twin Technology? URL: <https://aws.amazon.com/ru/what-is/digital-twin/> (дата звернення: 24.09.2022).

103. AWS IoT TwinMaker Features. URL: <https://aws.amazon.com/ru/iot-twinmaker/features/> (дата звернення: 26.09.2022).

104. Dashboard anything. Observe everything. URL: <https://grafana.com/grafana/> (дата звернення: 26.09.2022).

105. What is Amazon Managed Grafana? URL:

<https://docs.aws.amazon.com/grafana/latest/userguide/what-is-Amazon-Managed-Service-Grafana.html> (дата звернення: 26.09.2022).

106. Enabling miners to make better decisions. URL: <https://www.maptek.com/> (дата звернення: 28.09.2022).

107. MAXTADrill&Blast® allows you to optimise blast design for improved downstream performance. URL: <https://www.petradatascience.com/maxta-drillandblast/> (дата звернення: 28.09.2022).

108. MAXTAGeomet® allows for accurate mine planning and optimization. URL: <https://www.petradatascience.com/maxta-geomet/> (дата звернення: 29.09.2022).

109. Ansys Twin Builder. URL: <https://www.ansys.com/products/digital-twin/ansys-twin-builder> (дата звернення: 29.09.2022).

110. First of Its Kind Solution for Digital Twins in ANSYS 19.1 . URL: <https://www.ansys.com/blog/digital-twins-solutionansys-19-1> (дата звернення: 04.10.2022).

111. Carriots IoT Platform Offers Gateway to the Digital Twin. URL: [https://www.engineering.com/IOT/ArticleID/15680/Carriots-IoTPlatform-Offers-Gateway-to-the-Digital-Twin.aspx?e\\_src=relart](https://www.engineering.com/IOT/ArticleID/15680/Carriots-IoTPlatform-Offers-Gateway-to-the-Digital-Twin.aspx?e_src=relart) (дата звернення: 04.10.2022).

112. Viharos, Z., Kis, K.: Survey on Neuro-Fuzzy systems and their applications in technical diagnostics and measurement. *Measurement* 67. 2015. P.126–136.

113. Jang, J.S.R.: ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 23(3). 1993. P.665–685.

114. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. – 341 с.

115. Структурна схема управління ДСП «Чорнобильська АЕС URL: [https://chnpp.gov.ua/images/pdf/ChNPP\\_Inner\\_Structure\\_2023\\_2\\_ua.jpg](https://chnpp.gov.ua/images/pdf/ChNPP_Inner_Structure_2023_2_ua.jpg) (дата звернення: 02.03.2023)

116. Математичне моделювання процесів і систем / А. І. Жученко, Л. Р.

Ладієва, М. С. Піргач, Я. Ю. Жураковський. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 351 с.

117. Шушура О. М. Структури даних інформаційної технології нечіткого управління на основі функцій належності багатьох аргументів. *Зв'язок*. 2018. № 1. С. 21 – 24.

118. Martin L. Abbott. The Art of Scalability: Scalable Web Architecture, Processes, and Organizations for the Modern Enterprise. – Addison-Wesley Professional, 2015. – 624 с.

119. Martin Fowler, Microservices. URL: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html> (дата звернення: 18.04.2023).

120. Vikram Murugesan, Microservices Deployment Cookbook. – Packt Publishing, 2017. – 378 с.

121. Sam Newman. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. O'Reilly Media, 2015. – 280 с.

122. Sourabh Sharma, Rajesh RV, David Gonzalez. Microservices: Building Scalable Software. – Packt Publishing Limited, 2017. – 919 с.

123. Docker, Docker Documentation URL: <https://docs.docker.com/> (дата звернення: 18.04.2023).

124. Що таке Kubernetes? URL: <https://kubernetes.io/uk/docs/concepts/overview/what-is-kubernetes/> (дата звернення: 19.04.2023).

125. Вступ до Прометея і Графана URL: <https://techukraine.net/%D0%B2%D1%81%D1%82%D1%83%D0%BF-%D0%B4%D0%BE-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B5%D1%8F-%D1%96-%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B0%D0%BD%D0%B0/> (дата звернення: 19.04.2023).

126. 9. Автоматизація інцидентів: підвищення ефективності. URL:

<https://hashdork.com/uk/%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F-%D1%96%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%96%D0%B2/> (дата звернення: 19.04.2023).

127. What is the ELK Stack? URL: [https://aws.amazon.com/what-is/elk-stack/?nc1=h\\_ls](https://aws.amazon.com/what-is/elk-stack/?nc1=h_ls) (дата звернення: 19.04.2023).

128. SENTRY <https://hellip.com/ua/product/sentry.html> (дата звернення: 21.04.2023).

129. Що таке PostgreSQL та коли її використовувати. URL: <https://brander.ua/technologies/postgresql> (дата звернення: 21.04.2023).

130. NoSQL - переваги та недоліки нереляційних баз даних. URL: <https://qagroup.com.ua/publications/nosql-perevagy-ta-nedoliky-nereliatcijnykh-baz-danykh/> (дата звернення: 23.04.2023).

131. MONGO DB. URL: <https://brander.ua/technologies/mongo-db> (дата звернення: 23.04.2023).

132. What Is ClickHouse? URL: <https://clickhouse.com/docs/en/intro> (дата звернення: 23.04.2023).

133. Victoriametrics URL: <https://victoriametrics.com/products/> (дата звернення: 23.04.2023).

134. ArchiCAD - програмний пакет двох-і тривимірного моделювання для архітекторів. URL: [https://msmeta.com.ua/view\\_koshtorysni\\_programy.php?id=15](https://msmeta.com.ua/view_koshtorysni_programy.php?id=15) (дата звернення: 29.04.2023).

## ДОДАТОК А

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Loboda P.P., Starovit I.S. Architecture of the digital twin for the New safe confinement of the CHNPP. *Зв'язок*. 2022. №2. С. 22-26.

2. Лобода П.П., Старовіт І.С. Моделювання та управління процесами Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС на основі технології цифрових двійників. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Технічні науки*. 2023. №2(85). С. 168-173.

3. Лобода П.П., Старовіт І.С. Модель бази даних та знань цифрового двійника Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Computer Science and Applied Mathematic*. 2022. №2. С. 50-57.

4. Лобода П.П., Старовіт І.С. Розробка архітектури програмного забезпечення прогнозування і управління термогазодинамічними процесами і радіаційним станом Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Технічні науки*. 2022. №4(83). С. 67-73.

5. Loboda P.P. 3D visualization of the state of the new secure confinement of CHNPP using microservice architecture. *Зв'язок*. 2023. №3. С. 29-33.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

6. Loboda P.P., Koval O.B. Construction of the digital twin architecture for the New Safe Confinement of the CHNPP. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. У 2-х т. : Матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і*

студ. (присвячена 125-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського та 90-річчю НН ІАТЕ (ТЕФ)), м. Київ, 25–28 квіт.2023 р. / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка» Київ, 2023. Т. 2. С. 114 – 115.

7. Petro Loboda, Ivan Starovit. Data formalization of the digital twin for the New Safe Confinement of the CHNPP. *Новітні технологічні тенденції інтелектуальної індустрії та Інтернету речей.* : Матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. «ТТСІТ-2023», м. Київ, 24–25 січня 2023 р. / КНУБА Київ, 2023. С. 15 – 19.

8. Коваль О.В., Гаврилко Є.В., Лобода П.П., Старовіт І.С. Структура бази даних та знань цифрового двійника Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Інформаційні технології та інженерія* : Матеріали всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів, м. Миколаїв, 7–10 лютого 2023 р. / ЧНУ імені Петра Могили. Миколаїв, 2023. С. 100 – 101.

9. Лобода П.П. Програмне забезпечення цифрового двійника для підготовки персоналу Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Резильєнтність критичної інфраструктури – 2023* : Матеріали наук.-практ. конф., м. Київ, 21 червня 2023 р. / ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України Київ, 2023. С. 100 – 101.

10. Лобода П.П., Старовіт І.С., Коваль О.В., Гаврилко Є.В., Шушура О.М. Технологія цифрових двійників в задачах управління процесами Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Technologies and strategies for the implementation of scientific achievements* : collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the II International Scientific and Theoretical Conference, November 18, 2022. Stockholm, Kingdom of Sweden: European Scientific Platform, 2022. PP. 103 – 105.

11. Старовіт І.С., Лобода П.П., Гаврилко Є.В. Оптимізація роботи вентиляційних установок НБК ЧАЕС при змінних граничних умовах. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики.* У 2-х т. : Матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ. (присвячена 125-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського та 90-річчю НН ІАТЕ (ТЕФ)), м. Київ, 25–28 квіт.2023 р. / КПІ ім.

Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка» Київ, 2023. Т. 2. С. 111 – 112.

12. Старовіт І.С., Лобода П.П., Гаврилко Є.В., Шушура О.М. Нейро-нечітке управління вентиляцією нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *X Всеукр. наук.-практ. конф. здобув. вищої освіти та молод. вчених з автоматичного управління* : тези доп., 12 квіт.2023, Херсон – Хмельницький / редкол.: Рудакова Г.В. та ін. Херсон – Хмельницький, 2023. С. 57 – 59.

13. Лобода П.П. 3D візуалізація стану нового безпечного конфайнменту ЧАЕС на основі мікросервісної архітектури. *Achievements of 21st Century Scientific Community* : Матеріали I міжнародної наук.-практ. конф., м. Дніпро, 14-15 вересня 2023 р. / Мареніченко В.В. Дніпро, 2023. С. 282 – 284.

### **Відомості про апробацію результатів дисертації**

1. XX Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (25-28 квітня, 2023, м. Київ);

2. II Міжнародна науково-практична конференція «Новітні технологічні тенденції інтелектуальної індустрії та Інтернету речей» (24–25 січня, 2023, м. Київ);

3. Всеукраїнська науково-практична конференція «Інформаційні технології та інженерія» (7–10 лютого 2023, м. Миколаїв);

4. Науково-практична конференція «Резильєнтність критичної інфраструктури – 2023» (21 червня 2023, м. Київ);

5. II Міжнародна науково-практична конференція «Technologies and strategies for the implementation of scientific achievements» (November 18, 2022. Stockholm, Kingdom of Sweden);

6. X Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти та молод. вчених з автоматичного управління (12 квіт.2023, Херсон –

Хмельницький);

7. I Міжнародна науково-практична конференція «Achievements of 21st Century Scientific Community» (14-15 вересня 2023, м. Дніпро).



## ДОДАТОК Б

### АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ



ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ З УПРАВЛІННЯ ЗОНОЮ ВІДЧУЖЕННЯ  
ДЕРЖАВНЕ СПЕЦІАЛІЗОВАНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
«ЧОРНОБІЛЬСЬКА АЕС»

вул. Збройних Сил України, 7/1, м. Славутич, Вінницький р-н, Київська обл., Україна, 07100, а с 11.  
тел./факс: (04579) 2 56 70, комп'ютер: (04593) 4 31 07, 4 31 09.  
e-mail: office@chnpp.gov.ua, сайт: www.chnpp.gov.ua код ЄДРПОУ 14310862

Вих.№: 6700-149 від 29.06.2023

Ректору Національного технічного  
університету України "Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського".  
Академіку НАН України,  
д.т.н., професору М.З. Згуровському

Про впровадження результатів  
дисертаційної роботи  
П.П. Лободи

Національний технічний університет  
України "Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського",  
03056, м. Київ, Солом'янський район,  
проспект Берестейський, 37

Шановний Михайле Захаровичу!

Наше підприємство, ДСП «Чорнобильська АЕС», використовує програмні засоби для моделювання процесів і прогнозування наслідків без впливу на реальний фізичний об'єкт. Інформую Вас, що під час розробки і використання навчальних програмних засобів застосовано результати дисертаційної роботи «Методи та програмні засоби обробки даних цифрового двійника конфайнменту Чорнобильської атомної електростанції» аспіранта Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» ЛОБОДИ Петра Петровича, поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення».

Безпосередній внесок дисертаційного дослідження Петра Лободи полягає в розробці методу нейро-нечіткого управління вентиляційними системами Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС, архітектури та моделі структур даних його цифрового двійника, програмних засобів візуалізації інформації.

Застосування зазначених результатів 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.

Контрольна перевірка на фактичних даних показала, що застосування методу нейро-нечіткого управління вентиляційними системами та програмних засобів візуалізації інформації дозволяє оптимізувати процес підготовки персоналу НБК ЧАЕС.



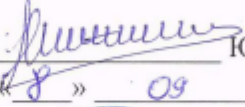

З повагою,

Начальник НТЦ ДСП ЧАЕС

кандидат технічних наук



Лариса САЛІЙ

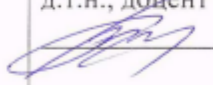

<p>“ПОГОДЖЕНО”</p> <p>В.О. директора Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського</p> <p> С.В. ШЕВЕЛЬ</p> <p>« 09 » 2023 р.</p> <p></p>	<p>“ЗАТВЕРДЖУЮ”</p> <p>Директор Інституту технічної теплофізики НАН України</p> <p> Ю.Ф. СНЕЖКІН</p> <p>« 09 » 2023 р.</p> <p></p>
---	--

### АКТ

про реалізацію результатів дисертаційної роботи Лободи Петра Петровича на  
тему «Методи та програмні засоби обробки даних цифрового двійника  
Конфайнменту Чорнобильської атомної електростанції»

Результати наукових досліджень Лободи Петра Петровича, а саме метод нейро-нечіткого управління вентиляційними системами Нового Безпечного Конфайнменту ЧАЕС, використано в науково-дослідних роботах, що ведуться в Інституті технічної теплофізики НАН України.

Аналіз та контрольна перевірка шляхом моделювання в Інституті технічної теплофізики на фактичних даних показала, що застосування запропонованого П.П. Лободою методу нейро-нечіткого управління вентиляційними системами потенційно дозволяє скоротити неорганізовані викиди повітря з радіоактивними аерозолями із Нового Безпечного Конфайнмента ЧАЕС в оточуюче середовище в середньому на 17,2%.

<p>Завідувач кафедри Інженерії програмного забезпечення в енергетиці д.т.н., доцент</p> <p> О.В. Коваль</p>	<p>Завідувач лабораторії моделювання процесів тепломасообміну, д.т.н., професор</p> <p> П.Г. Круковський</p>
--	--



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної роботи

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського»



Анатолій МЕЛЬНИЧЕНКО

09 2023 року

## АКТ

**про впровадження в навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» наукових положень і результатів дисертаційної роботи ЛОБОДИ Петра Петровича на тему «Методи та програмні засоби обробки даних цифрового двійника конфайнменту Чорнобильської атомної електростанції»**

Комісія в складі голови – заступника директора Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики д.т.н., професора Євгена ГАВРИЛКА та членів комісії: професора кафедри Інженерії програмного забезпечення в енергетиці д.т.н., професора Олега БАРАБАША та професора кафедри Інженерії програмного забезпечення в енергетиці д.т.н., доцента Андрія МУСІЄНКА, склала цей акт про те, що наукові положення та результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії аспіранта Петра ЛОБОДИ на тему «Методи та програмні засоби обробки даних цифрового двійника конфайнменту Чорнобильської атомної електростанції», а саме архітектура цифрового двійника Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС та моделі його баз даних і знань, метод нейро-нечіткого управління вентиляційними системами конфайнменту введено в навчальний процес кафедри Інженерії програмного забезпечення в енергетиці Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисципліни «Проектування інформаційних систем з нечіткою логікою» для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» денної форми навчання.

Голова комісії

Заступник директора Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики  
доктор технічних наук, професор

Євген ГАВРИЛКО

Члени комісії:

Професор кафедри Інженерії програмного забезпечення в енергетиці  
доктор технічних наук, професор

Олег БАРАБАШ

Професор кафедри Інженерії програмного забезпечення в енергетиці  
доктор технічних наук, професор

Андрій МУСІЄНКО

## ДОДАТОК В

### ЛІСТИНГИ КОДУ ПРОГРАМНИХ РЕАЛІЗАЦІЙ

Файл main\_entities.sql - модель бази даних, postgres

```
-- Enum type for SensorType
CREATE TYPE SensorTypeEnum AS ENUM (
    'Temperature',
    'Pressure',
    'Flow',
    'Level',
    'Radiation',
    'Vibration',
    -- ... add other sensor types as needed
);

-- Creating Sensors table
CREATE TABLE Sensors (
    Sensor_ID SERIAL PRIMARY KEY,
    SensorName VARCHAR(255) NOT NULL,
    SensorType SensorTypeEnum NOT NULL,
    Point_ID INT NOT NULL,
    System_ID INT NOT NULL,
    Sensor_TR BOOLEAN NOT NULL
);

-- Indexes (optional, for better performance)
CREATE INDEX idx_sensors_point_id ON Sensors(Point_ID);
CREATE INDEX idx_sensors_system_id ON Sensors(System_ID);

-- Creating Systems table
CREATE TABLE Systems (
    System_ID SERIAL PRIMARY KEY,
```

```

    SystemName VARCHAR(255) NOT NULL,
    UP_System_ID INT,
    FOREIGN KEY (UP_System_ID) REFERENCES Systems (System_ID)
);

-- Updating the Sensors table to add the foreign key relationship
ALTER TABLE Sensors
ADD FOREIGN KEY (System_ID) REFERENCES Systems(System_ID);

-- Creating MeasurementPoints table
CREATE TABLE MeasurementPoints (
    Point_ID SERIAL PRIMARY KEY,
    PointName VARCHAR(255) NOT NULL,
    PointX FLOAT NOT NULL,
    PointY FLOAT NOT NULL,
    PointZ FLOAT NOT NULL
);

-- Updating the Sensors table to add the foreign key relationship
ALTER TABLE Sensors
ADD FOREIGN KEY (Point_ID) REFERENCES MeasurementPoints(Point_ID);

-- Creating MeasurementResults table
CREATE TABLE MeasurementResults (
    t TIMESTAMP NOT NULL,
    Point_ID INT NOT NULL,
    Sensor_ID INT NOT NULL,
    System_ID INT NOT NULL,
    V_ID INT NOT NULL,
    MR_Value FLOAT NOT NULL,
    TR BOOLEAN NOT NULL,
    PRIMARY KEY (t, Point_ID, Sensor_ID, System_ID, V_ID),
    FOREIGN KEY (Point_ID) REFERENCES MeasurementPoints(Point_ID),
    FOREIGN KEY (Sensor_ID) REFERENCES Sensors(Sensor_ID),

```

```

FOREIGN KEY (System_ID) REFERENCES Systems(System_ID)
);

-- Indexes (optional, for better performance)
CREATE INDEX idx_measurementresults_point_id ON MeasurementResults(Point_ID);
CREATE INDEX idx_measurementresults_sensor_id ON MeasurementResults(Sensor_ID);
CREATE INDEX idx_measurementresults_system_id ON
MeasurementResults(System_ID);

-- Enum type for Color
CREATE TYPE ColorEnum AS ENUM (
    'Green',
    'Yellow',
    'Red'
);

-- Creating ColorLimits table
CREATE TABLE ColorLimits (
    V_ID INT NOT NULL,
    Interval_ID SERIAL PRIMARY KEY,
    Color ColorEnum NOT NULL,
    LeftBorder FLOAT,
    RightBorder FLOAT,
    Point_ID INT,
    FOREIGN KEY (V_ID) REFERENCES MeasurementResults(V_ID),
    FOREIGN KEY (Point_ID) REFERENCES MeasurementPoints(Point_ID)
);

-- Indexes (optional, for better performance)
CREATE INDEX idx_colorlimits_v_id ON ColorLimits(V_ID);
CREATE INDEX idx_colorlimits_point_id ON ColorLimits(Point_ID);

-- Creating MeasurementUnits table
CREATE TABLE MeasurementUnits (

```

```

Unit_ID SERIAL PRIMARY KEY,
UnitName VARCHAR(255) NOT NULL
);

-- Creating Values table
CREATE TABLE Values (
    V_ID SERIAL PRIMARY KEY,
    ValueName VARCHAR(255) NOT NULL,
    Unit_ID INT NOT NULL,
    FOREIGN KEY (Unit_ID) REFERENCES MeasurementUnits(Unit_ID)
);

-- Update the foreign key reference in the ColorLimits table
ALTER TABLE ColorLimits
ADD FOREIGN KEY (V_ID) REFERENCES Values(V_ID);

-- Update the foreign key reference in the MeasurementResults table
ALTER TABLE MeasurementResults
ADD FOREIGN KEY (V_ID) REFERENCES Values(V_ID);

-- Indexes (optional, for better performance)
CREATE INDEX idx_values_unit_id ON Values(Unit_ID);
CREATE INDEX idx_measurementresults_v_id ON MeasurementResults(V_ID);

CREATE TABLE AlgorithmExecution (
    Execution_ID SERIAL PRIMARY KEY,
    AlgorithmName TEXT,
    ExecutedBy TEXT,
    ExecutionTimestamp TIMESTAMP,
    Comments TEXT
);

CREATE TABLE KmeansInitialization (
    Initialization_ID SERIAL PRIMARY KEY,

```



```

    Execution_ID INT REFERENCES AlgorithmExecution(Execution_ID),
    InitialCentroids JSONB,
    K INT
);

```

```

CREATE TABLE KmeansOutput (
    Output_ID SERIAL PRIMARY KEY,
    Execution_ID INT REFERENCES AlgorithmExecution(Execution_ID),
    ClusterCentroids JSONB,
    ClusterAssignments JSONB
);

```

```

CREATE TABLE RMA (
    Model_ID SERIAL PRIMARY KEY,
    Algorithm_ID SERIAL,
    FOREIGN KEY (Model_ID) REFERENCES Models(Model_ID),
    FOREIGN KEY (Algorithm_ID) REFERENCES Algorithms(Algorithm_ID)
);

```

```

CREATE TYPE array_type AS ENUM ('Value1', 'Value2', 'Value3'); -- Assume that these
are possible values for arrays VMVI, VMVO, and VMVP

```

```

CREATE TABLE ForecastResults (
    NMR_ID SERIAL PRIMARY KEY,
    t TIMESTAMP,
    Model_ID SERIAL,
    User_ID SERIAL,
    VMVI array_type[],
    VMVO array_type[],
    VMVP array_type[],
    FOREIGN KEY (Model_ID) REFERENCES Models(Model_ID),
    FOREIGN KEY (User_ID) REFERENCES Users(User_ID)
);

```

```

CREATE TABLE IdentificationResults (
    NMP_ID SERIAL PRIMARY KEY,
    t TIMESTAMP,
    Model_ID SERIAL,
    Algorithm_ID SERIAL,
    User_ID SERIAL,
    VMVI array_type[],
    VMVO array_type[],
    VMVOF array_type[],
    VMVP array_type[],
    CA DECIMAL,
    FOREIGN KEY (Model_ID) REFERENCES Models(Model_ID),
    FOREIGN KEY (Algorithm_ID) REFERENCES Algorithms(Algorithm_ID),
    FOREIGN KEY (User_ID) REFERENCES Users(User_ID)
);

```

Файл orm.py - класи для реалізації серверної логіки, та інтеграції з базою даних

```

# Connecting to the database
engine = create_engine('postgresql://ploboda:@localhost/PhD')
Base.metadata.create_all(engine)

from sqlalchemy import create_engine, Column, Integer, String, Float, Boolean, Enum,
ForeignKey, TIMESTAMP
from sqlalchemy.ext.declarative import declarative_base
from sqlalchemy.orm import relationship

Base = declarative_base()

class ColorEnum(Enum):
    Green = "Green"
    Yellow = "Yellow"
    Red = "Red"

```

```

class MeasurementUnits(Base):
    __tablename__ = 'MeasurementUnits'
    Unit_ID = Column(Integer, primary_key=True)
    UnitName = Column(String(255), nullable=False)

    values = relationship("Values", back_populates="measurement_unit")

class Values(Base):
    __tablename__ = 'Values'
    V_ID = Column(Integer, primary_key=True)
    ValueName = Column(String(255), nullable=False)
    Unit_ID = Column(Integer, ForeignKey('MeasurementUnits.Unit_ID'), nullable=False)

    measurement_unit = relationship("MeasurementUnits", back_populates="values")
    measurement_results = relationship("MeasurementResults", back_populates="value")
    color_limits = relationship("ColorLimits", back_populates="value")

class Systems(Base):
    __tablename__ = 'Systems'
    System_ID = Column(Integer, primary_key=True)
    SystemName = Column(String(255), nullable=False)
    UP_System_ID = Column(Integer, nullable=True)

    sensors = relationship("Sensors", back_populates="system")
    measurement_results = relationship("MeasurementResults", back_populates="system")

class MeasurementPoints(Base):
    __tablename__ = 'MeasurementPoints'
    Point_ID = Column(Integer, primary_key=True)
    PointName = Column(String(255), nullable=False)
    PointX = Column(Float, nullable=False)
    PointY = Column(Float, nullable=False)
    PointZ = Column(Float, nullable=False)

```

```

sensors = relationship("Sensors", back_populates="measurement_point")
measurement_results = relationship("MeasurementResults",
back_populates="measurement_point")
color_limits = relationship("ColorLimits", back_populates="measurement_point")

class Sensors(Base):
    __tablename__ = 'Sensors'
    Sensor_ID = Column(Integer, primary_key=True)
    SensorName = Column(String(255), nullable=False)
    SensorType = Column(String(50), nullable=False)
    Point_ID = Column(Integer, ForeignKey('MeasurementPoints.Point_ID'), nullable=False)
    System_ID = Column(Integer, ForeignKey('Systems.System_ID'), nullable=False)
    Sensor_TR = Column(Boolean, nullable=False)

    system = relationship("Systems", back_populates="sensors")
    measurement_point = relationship("MeasurementPoints", back_populates="sensors")
    measurement_results = relationship("MeasurementResults", back_populates="sensor")

class MeasurementResults(Base):
    __tablename__ = 'MeasurementResults'
    t = Column(TIMESTAMP, primary_key=True)
    Point_ID = Column(Integer, ForeignKey('MeasurementPoints.Point_ID'),
primary_key=True)
    Sensor_ID = Column(Integer, ForeignKey('Sensors.Sensor_ID'), primary_key=True)
    System_ID = Column(Integer, ForeignKey('Systems.System_ID'), primary_key=True)
    V_ID = Column(Integer, ForeignKey('Values.V_ID'), primary_key=True)
    MR_Value = Column(Float, nullable=False)
    TR = Column(Boolean, nullable=False)

    system = relationship("Systems", back_populates="measurement_results")
    sensor = relationship("Sensors", back_populates="measurement_results")
    measurement_point = relationship("MeasurementPoints",
back_populates="measurement_results")
    value = relationship("Values", back_populates="measurement_results")

```

```

class ColorLimits(Base):
    __tablename__ = 'ColorLimits'
    V_ID = Column(Integer, ForeignKey('Values.V_ID'), nullable=False)
    Interval_ID = Column(Integer, primary_key=True)
    Color = Column(ColorEnum, nullable=False)
    LeftBorder = Column(Float, nullable=True)
    RightBorder = Column(Float, nullable=True)
    Point_ID = Column(Integer, ForeignKey('MeasurementPoints.Point_ID'), nullable=True)

    value = relationship("Values", back_populates="color_limits")
    measurement_point = relationship("MeasurementPoints", back_populates="color_limits")

```

```

class Models(Base):
    __tablename__ = 'Models'
    Model_ID = Column(Integer, primary_key=True)
    ModelName = Column(String, nullable=False)
    ModelStatus = Column(Boolean, nullable=False)
    UP_Model_ID = Column(Integer, ForeignKey('Models.Model_ID'), nullable=True) #
    assuming a model can be a sub-model of another

    # Relationships
    input_variables = relationship("VIModels", back_populates="model")
    output_variables = relationship("VOModels", back_populates="model")
    parameters = relationship("PModels", back_populates="model")
    sub_models = relationship("Models", backref="parent_model", remote_side=[Model_ID])

```

```

class VIModels(Base):
    __tablename__ = 'VIModels'
    Model_ID = Column(Integer, ForeignKey('Models.Model_ID'), primary_key=True)
    MVName = Column(String, nullable=False)
    V_ID = Column(Integer, nullable=False) # Assuming a foreign key to Values table

    # Relationship

```

```
model = relationship("Models", back_populates="input_variables")
```

```
class VOModels(Base):
```

```
    __tablename__ = 'VOModels'
```

```
    Model_ID = Column(Integer, ForeignKey('Models.Model_ID'), primary_key=True)
```

```
    MVOName = Column(String, nullable=False)
```

```
    V_ID = Column(Integer, nullable=False) # Assuming a foreign key to Values table
```

```
    # Relationship
```

```
    model = relationship("Models", back_populates="output_variables")
```

```
class PModels(Base):
```

```
    __tablename__ = 'PModels'
```

```
    Model_ID = Column(Integer, ForeignKey('Models.Model_ID'), primary_key=True)
```

```
    MPName = Column(String, nullable=False)
```

```
    V_ID = Column(Integer, nullable=False) # Assuming a foreign key to Values table
```

```
    # Relationship
```

```
    model = relationship("Models", back_populates="parameters")
```

```
class ForecastResults(Base):
```

```
    __tablename__ = 'ForecastResults'
```

```
    NMR_ID = Column(Integer, primary_key=True, autoincrement=True)
```

```
    t = Column(DateTime)
```

```
    Model_ID = Column(Integer, ForeignKey('Models.Model_ID'))
```

```
    User_ID = Column(Integer, ForeignKey('Users.User_ID'))
```

```
    VMVI = Column(ARRAY(String))
```

```
    VMVO = Column(ARRAY(String))
```

```
    VMVP = Column(ARRAY(String))
```

```
    user = relationship("UserModel", back_populates="forecast_results")
```

```
    model = relationship("ModelModel", back_populates="forecast_results")
```

```
UserModel.forecast_results = relationship("ForecastResults", back_populates="user")
```

```
ModelModel.forecast_results = relationship("ForecastResults", back_populates="model")
```

```

class IdentificationResults(Base):
    __tablename__ = 'IdentificationResults'
    NMP_ID = Column(Integer, primary_key=True, autoincrement=True)
    t = Column(DateTime)
    Model_ID = Column(Integer, ForeignKey('Models.Model_ID'))
    Algorithm_ID = Column(Integer, ForeignKey('Algorithms.Algorithm_ID'))
    User_ID = Column(Integer, ForeignKey('Users.User_ID'))
    VMVI = Column(ARRAY(String))
    VMVO = Column(ARRAY(String))
    VMVOF = Column(ARRAY(String))
    VMVP = Column(ARRAY(String))
    CA = Column(Float)
    user = relationship("UserModel", back_populates="identification_results")
    model = relationship("ModelModel", back_populates="identification_results")
    algorithm = relationship("AlgorithmModel", back_populates="identification_results")

```

```

UserModel.identification_results = relationship("IdentificationResults",
back_populates="user")
ModelModel.identification_results = relationship("IdentificationResults",
back_populates="model")
AlgorithmModel.identification_results = relationship("IdentificationResults",
back_populates="algorithm")

```

```

class RMA(Base):
    __tablename__ = 'RMA'
    Model_ID = Column(Integer, ForeignKey('Models.Model_ID'), primary_key=True)
    Algorithm_ID = Column(Integer, ForeignKey('Algorithms.Algorithm_ID'))
    model = relationship("ModelModel", back_populates="rma")
    algorithm = relationship("AlgorithmModel", back_populates="rma")

```

```

ModelModel.rma = relationship("RMA", back_populates="model")
AlgorithmModel.rma = relationship("RMA", back_populates="algorithm")

```

```
Base.metadata.create_all(engine)
```

app.py - приклад реалізації логіки на серверній стороні

```
--pip install Flask Flask-Admin
```

```
from flask import Flask, request, redirect, url_for, render_template
from flask_admin import Admin
from flask_admin.contrib.sqla import ModelView
from flask_uploads import UploadSet, configure_uploads, DATA
from sqlalchemy import create_engine
from sqlalchemy.orm import scoped_session, sessionmaker
from your_classes_file import Base, Systems, Sensors, MeasurementUnits, Values,
MeasurementPoints, MeasurementResults, ColorLimits
import pandas as pd
import import_data

# Initialize Flask and set some configs
app = Flask(__name__)
app.config['SECRET_KEY'] = '----'
app.config['SESSION_TYPE'] = '----'

# Setup the database
engine = create_engine('postgresql://ploboda:@localhost/PhD')
session = scoped_session(sessionmaker(bind=engine))

# Create an admin
admin = Admin(app, name='AdminPanel', template_mode='bootstrap3')

# Add model views
admin.add_view(ModelView(Systems, session))
admin.add_view(ModelView(Sensors, session))
admin.add_view(ModelView(MeasurementUnits, session))
admin.add_view(ModelView(Values, session))
```



```

admin.add_view(ModelView(MeasurementPoints, session))
admin.add_view(ModelView(MeasurementResults, session))
admin.add_view(ModelView(ColorLimits, session))

# Setup file upload
datafiles = UploadSet('data', DATA)
app.config['UPLOADED_DATA_DEST'] = 'uploads'
configure_uploads(app, datafiles)

@app.route('/upload', methods=['GET', 'POST'])
def upload():
    if request.method == 'POST' and 'data' in request.files:
        file = request.files['data']
        file_path = os.path.join(app.config['UPLOADED_DATA_DEST'], file.filename)
        file.save(file_path)
        import_data.import_csv_to_db(file_path) # call the import function
        return redirect(url_for('admin.index'))
    return render_template('upload.html')

@app.route('/api/sensors')
def sensors():
    sensor_data = get_sensor_data()
    return jsonify(sensor_data)

if __name__ == '__main__':
    # Create tables
    Base.metadata.create_all(bind=engine)
    # Run the Flask web server
    app.run(debug=True)

from sqlalchemy import create_engine
from sqlalchemy.orm import sessionmaker
from orm.py import Base, Sensors, MeasurementPoints, Systems

```

```

# Create an engine and a session
engine = create_engine('postgresql://ploboda:@localhost/PhD')
Base.metadata.bind = engine
DBSession = sessionmaker(bind=engine)
session = DBSession()

def get_sensor_data():
    sensor_locations = session.query(
        MeasurementPoints.PointX,
        MeasurementPoints.PointY,
        MeasurementPoints.PointZ
    ).join(
        Sensors, Sensors.Point_ID == MeasurementPoints.Point_ID
    ).all()

    return sensor_locations

sensor_data = get_sensor_data()

session.close()

```

import\_data.py - приклад реалізації логіки імпорту історичних даних про температури з датчиків

```

import pandas as pd
from sqlalchemy import create_engine
from sqlalchemy.orm import sessionmaker
from your_classes_file import MeasurementResults

```

```

# Connect to the database
engine = create_engine('postgresql://ploboda:@localhost/PhD')
Session = sessionmaker(bind=engine)
session = Session()

```

```

def validate_data(df):

```

```

# Add validation logic here.
if df.isnull().values.any():
    raise ValueError("Missing values detected")

def import_csv_to_db(file_path):
    try:
        # Load the data
        data = pd.read_csv(file_path)

        # Validate the data
        validate_data(data)

        # Iterate over the rows of the dataframe and create MeasurementResults objects
        for index, row in data.iterrows():
            measurement = MeasurementResults(
                t=row['t'],
                Point_ID=row['Point_ID'],
                Sensor_ID=row['Sensor_ID'],
                System_ID=row['System_ID'],
                V_ID=row['V_ID'],
                MR_Value=row['MR_Value'],
                TR=row['TR']
            )
            session.add(measurement)

        # Commit the transaction
        session.commit()
        print("Data imported successfully")

    except Exception as e:
        # Rollback the transaction in case of error
        session.rollback()
        print(f'An error occurred: {e}')

```

```

finally:
    # Close the session
    session.close()

if __name__ == "__main__":
    import_csv_to_db('historical_data.csv')

<!doctype html>
<html lang="en">
<head>
    <!-- ... other head elements ... -->
    <title>File Upload</title>
</head>
<body>
    <h1>Upload Data File</h1>
    <form method="post" enctype="multipart/form-data">
        <input type="file" name="data" accept=".csv">
        <button type="submit">Upload</button>
    </form>
</body>
</html>

```

visualize3D.html - приклад реалізації логіки відображення 3D моделі в веб

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
    <meta charset="UTF-8">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
    <title>3D Model with Sensors</title>
    <style>
        body { margin: 0; }
        #canvas { width: 100vw; height: 100vh; }
    </style>
</head>

```

```
<body>
```

```
<div id="canvas"></div>
```

```
<script src="https://threejs.org/build/three.js"></script>
```

```
<script src="https://threejs.org/examples/js/loaders/OBJLoader.js"></script>
```

```
<script src="https://threejs.org/examples/js/controls/OrbitControls.js"></script>
```

```
<script>
```

```
  async function fetchSensorData() {
    const response = await fetch('/api/sensors');
    return await response.json();
  }
```

```
  // Initialize the scene, camera, and renderer
```

```
  var scene = new THREE.Scene();
```

```
  var camera = new THREE.PerspectiveCamera(75,
window.innerWidth/window.innerHeight, 0.1, 1000);
```

```
  var renderer = new THREE.WebGLRenderer({ antialias: true, canvas:
document.getElementById('canvas') });
```

```
  renderer.setSize(window.innerWidth, window.innerHeight);
```

```
  document.body.appendChild(renderer.domElement);
```

```
  // Load the OBJ model
```

```
  var loader = new THREE.OBJLoader();
```

```
  loader.load('model.obj', function (object) {
```

```
    scene.add(object);
```

```
    addSensors();
```

```
  });
```

```
  // Fetch and visualize sensor data
```

```
  async function addSensors() {
```

```
    const sensorData = await fetchSensorData();
```

```
    sensorData.forEach(data => {
```

```

    const [x, y, z] = data;
    const sensorGeometry = new THREE.SphereGeometry(0.05);
    const sensorMaterial = new THREE.MeshBasicMaterial({ color: 0xff0000 });
    const sensor = new THREE.Mesh(sensorGeometry, sensorMaterial);
    sensor.position.set(x, y, z);
    scene.add(sensor);
  });
  animate();
}

// Setup OrbitControls for camera control
var controls = new THREE.OrbitControls(camera, renderer.domElement);
camera.position.set(0, 1, 3);
controls.update();

function animate() {
  requestAnimationFrame(animate);
  controls.update();
  renderer.render(scene, camera);
}
</script>

</body>
</html>

```

import\_data.py - приклад реалізації логіки роботи з даними, алгоритм К-середніх

```

import psycopg2
import numpy as np
from sklearn.cluster import KMeans
from datetime import datetime
import pandas as pd

def main():

```

```

# Obtain datetime range from user
start_datetime = '2022-01-01 00:00:00' # replace with user input
end_datetime = '2022-12-31 23:59:59' # replace with user input

# Connect to your database
conn = psycopg2.connect('postgresql://ploboda:@localhost/PhD')
cur = conn.cursor()

# Query to get data
query = f"""
    SELECT Sensor_ID, t, MR_Value
    FROM MeasurementResults
    WHERE t BETWEEN '{start_datetime}' AND '{end_datetime}'
    ORDER BY Sensor_ID, t
    """
df = pd.read_sql(query, conn)

# Data Preparation
pivot_table = df.pivot(index='Sensor_ID', columns='t', values='MR_Value').fillna(0)
data = pivot_table.values # This will be the input to the K-means algorithm

# Record the algorithm execution
cur.execute("""
    INSERT INTO AlgorithmExecution (AlgorithmName, ExecutedBy,
ExecutionTimestamp, Comments)
    VALUES (%s, %s, %s, %s) RETURNING Execution_ID;
    """, (
    'K-means', 'user123', datetime.now(), 'K-means clustering based on sensor data within
specified datetime range'))
execution_id = cur.fetchone()[0]

# Specify the number of clusters (assuming 2 for simplicity)
k = 2

```

```

# Execute the K-means algorithm
kmeans = KMeans(n_clusters=k).fit(data)
cluster_centroids = kmeans.cluster_centers_.tolist()
cluster_assignments = kmeans.labels_.tolist()

# Assuming you have created the necessary tables to store the K-means output.
# Storing results (ClusterCentroids and ClusterAssignments) in KmeansOutput table.
cur.execute("""
    INSERT INTO KmeansOutput (Execution_ID, ClusterCentroids, ClusterAssignments)
    VALUES (%s, %s, %s);
""", (execution_id, cluster_centroids, cluster_assignments))

# Commit the transaction
conn.commit()

# Close the database connection
cur.close()
conn.close()

if __name__ == "__main__":
    main()

```

НБК\_ЧАЕС\_OUkr.ifc - фрагмент 3D моделі об'єкту укриття (ОУ)

ISO-10303-21;

HEADER;FILE\_DESCRIPTION(('ViewDefinition [CoordinationView\_V2.0]','Option  
[Elements to export: Filtered elements]','Option [Partial Structure Display: Entire  
Model]','Option [IFC Domain: All]','Option [Structural Function: All Elements]','Option  
[Convert Grid elements: On]','Option [Convert IFC Annotations and ARCHICAD 2D  
elements: Off]','Option [Convert 2D symbols of Doors and Windows: Off]','Option [Export  
geometries that Participates in Collision Detection only: Off]','Option [Split complex  
elements: Off]','Option [Material Preservation: Explode where necessary]','Option [Elements  
in Solid Element Operations: Extruded/revolved]','Option [Elements with junctions:  
Extruded/revolved without junctions]','Option [Slabs with slanted edge(s):



Extruded'],'Option [IFC Site Location: At Project Origin'],'Option [Curtain Wall export mode: Container Element'],'Option [Railing export mode: Single Element'],'Option [Stair export mode: Container Element'],'Option [Properties To Export: All properties'],'Option [Space containment: Off'],'Option [Bounding Box: Off'],'Option [Geometry to type objects: Off'],'Option [Element Properties: All'],'Option [Building Material Properties: Off'],'Option [Element Parameters: Off'],'Option [Component Parameters: Off'],'Option [IFC Base Quantities: Off'],'Option [Door Window Parameters: On'],'Option [IFC Space boundaries: Off'],'Option [ARCHICAD Zone Categories as IFC Space classification data: Off'],'Option [Element Classifications: On]'),'2;1');

FILE\_NAME('E:\\X2\\0420041E0411041E04270410\\X0\\2023\\05\_\\X2\\041A043E043D044404300439043C0435043D0442\\X0\\02\_\\X2\\04120438044504560434043D0456\\X0\\03\_16.08.2023\\X2\\041D0411041A\\X0\_\\X2\\0427041004150421\\X0\_\\OU.ifc','2023-08-19T00:19:57','Architect'),('Building Designer Office'),'The EXPRESS Data Manager Version 5.02.0100.09 : 26 Sep 2013','IFC file generated by GRAPHISOFT ARCHICAD 24.0.0 RUS FULL Windows version (IFC add-on version: 5000 RUS FULL).','The authorising person');

FILE\_SCHEMA(('IFC2X3'));

ENDSEC;

DATA;

#1= IFCPERSON(\$,'X2\\041D0435\\X0\\X2\\043E043F0440043504340435043B0435043D\\X0\\',,\$,\$,\$,\$,\$);

#3= IFCORGANIZATION(\$,'X2\\041D0435\\X0\\X2\\043E043F0440043504340435043B0435043D\\X0\\',,\$,\$,\$);

#7= IFCPERSONANDORGANIZATION(#1,#3,\$);

#10= IFCORGANIZATION('GS','GRAPHISOFT','GRAPHISOFT',,\$,\$);

#11= IFCAPPLICATION(#10,'24.0.0','ARCHICAD','IFC add-on version: 5000 RUS FULL');

#12= IFCOWNERHISTORY(#7,#11,\$,NOCHANGE.,,\$,\$,1692393597);

#13= IFCSIUNIT(\*,LENGTHUNIT,.,MILLI,.,METRE.);

#14= IFCSIUNIT(\*,AREAUNIT,.,SQUARE\_METRE.);

#15= IFCSIUNIT(\*,VOLUMEUNIT,.,CUBIC\_METRE.);

#16= IFCSIUNIT(\*,PLANEANGLEUNIT,.,RADIAN.);

#17= IFCMEASUREWITHUNIT(IFCPLANEANGLEMEASURE(0.0174532925199),#16);

```

#18= IFCDIMENSIONALEXPONENTS(0,0,0,0,0,0,0);
#19= IFCCONVERSIONBASEDUNIT(#18,.PLANEANGLEUNIT.,'DEGREE',#17);
#20= IFCSIUNIT(*,.SOLIDANGLEUNIT.,$,STERADIAN.);
#21= IFCMONETARYUNIT(.RUR.);
#22= IFCSIUNIT(*,.TIMEUNIT.,$,SECOND.);
#23= IFCMEASUREWITHUNIT(IFCTIMEMEASURE(31556926.),#22);
#24= IFCDIMENSIONALEXPONENTS(0,0,1,0,0,0,0);
#25= IFCCONVERSIONBASEDUNIT(#24,.TIMEUNIT.,'Year',#23);
#26= IFCSIUNIT(*,.MASSUNIT.,KILO.,GRAM.);
#27=
IFCSIUNIT(*,.THERMODYNAMICTEMPERATUREUNIT.,$,DEGREE_CELSIUS.);
#28= IFCSIUNIT(*,.LUMINOUSINTENSITYUNIT.,$,LUMEN.);
#29= IFCSIUNIT(*,.ENERGYUNIT.,MEGA.,JOULE.);
#30= IFCDERIVEDUNIT((#33,#35,#37),.THERMALCONDUCTANCEUNIT.,$);
#32= IFCSIUNIT(*,.POWERUNIT.,$,WATT.);
#33= IFCDERIVEDUNITELEMENT(#32,1);
#34= IFCSIUNIT(*,.LENGTHUNIT.,$,METRE.);
#35= IFCDERIVEDUNITELEMENT(#34,-1);
#36= IFCSIUNIT(*,.THERMODYNAMICTEMPERATUREUNIT.,$,KELVIN.);
#37= IFCDERIVEDUNITELEMENT(#36,-1);
#38= IFCDERIVEDUNIT((#41,#43,#45),.SPECIFICHEATCAPACITYUNIT.,$);
#40= IFCSIUNIT(*,.ENERGYUNIT.,$,JOULE.);
#41= IFCDERIVEDUNITELEMENT(#40,1);
#42= IFCSIUNIT(*,.MASSUNIT.,KILO.,GRAM.);
#43= IFCDERIVEDUNITELEMENT(#42,-1);
#44= IFCSIUNIT(*,.THERMODYNAMICTEMPERATUREUNIT.,$,KELVIN.);
#45= IFCDERIVEDUNITELEMENT(#44,-1);
#46= IFCDERIVEDUNIT((#49,#51),.MASSDENSITYUNIT.,$);
#48= IFCSIUNIT(*,.MASSUNIT.,KILO.,GRAM.);
#49= IFCDERIVEDUNITELEMENT(#48,1);
#50= IFCSIUNIT(*,.VOLUMEUNIT.,$,CUBIC_METRE.);
#51= IFCDERIVEDUNITELEMENT(#50,-1);
#52=
IFCUNITASSIGNMENT((#13,#14,#15,#19,#20,#21,#25,#26,#27,#28,#29,#30,#38,#46));

```

```

#54= IFCDIRECTION((1.,0.,0.));
#58= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#60= IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#62= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#60,#58,#54);
#63= IFCDIRECTION((0.,1.));
#65= IFCGEOMETRICREPRESENTATIONCONTEXT($,'Model',3,0.01,#62,#63);
#68=
IFCPROJECT('344O7vICcwH8qAEnwJDjSU',#12,'\X2\041F0440043E0435043A0442\X0'
,$,$,$,$,(#65),#52);
#75= IFCDIRECTION((1.,0.,0.));
#77= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#79= IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#81= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#79,#77,#75);
#82= IFCLOCALPLACEMENT($,#81);
#85=
IFCSITE('20FpTZCqJy2vhVJYtjuIce',#12,'\X2\041C043504410442043D043E0441044204
4C\X0',$,$,#82,$,$,.ELEMENT.,(55,45,0,0),(37,35,0,0),0.,$,$);
#91= IFCRELAGGREGATES('0Du7$nzQXCktKIPUTLFSAT',#12,$,$,#68,(#85));
#97= IFCDIRECTION((1.,0.,0.));
#99= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#101= IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#103= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#101,#99,#97);
#104= IFCLOCALPLACEMENT(#82,#103);
#106=
IFCBUILDING('00tMo7QcxqWdIGvc4sMN2A',#12,'\X2\041704340430043D04380435\X0
',$,$,#104,$,$,.ELEMENT.,$,$,$);
#108= IFCRELAGGREGATES('2b_h_mYcGArd6glJG2Fmbt',#12,$,$,#85,(#106));
#112= IFCDIRECTION((1.,0.,0.));
#114= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#116= IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#118= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#116,#114,#112);
#119= IFCLOCALPLACEMENT(#104,#118);
#121= IFCBUILDINGSTOREY('2GrWVBVoHEzAaOLT1bybUW',#12,'1.
\X2\042D044204300436\X0',$,$,#119,$,$,.ELEMENT.,0.);

```

```

#123= IFCRELAGGREGATES('118jwqMnuwK1xuf97w7fU5',#12,$,$,#106,(#121));
#127= IFCDIRECTION((1.,0.,0.));
#129= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#131= IFCCARTESIANPOINT((263057.217798,-14955.9400263,38000.));
#133= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#131,#129,#127);
#134= IFCLOCALPLACEMENT(#119,#133);
#136=
IFCGEOMETRICREPRESENTATIONSUBCONTEXT('Body','Model',*,*,*,*,#65,$,.MODEL_VIEW.,$);
#138= IFCCARTESIANPOINT((0.,0.));
#140= IFCCARTESIANPOINT((-247684.595605,0.));
#142= IFCCARTESIANPOINT((-247684.595605,-20000.));
#144= IFCCARTESIANPOINT((0.,-20000.));
#146= IFCPOLYLINE((#138,#140,#142,#144,#138));
#148= IFCARBITRARYCLOSEDPROFILEDEF(.AREA.,",#146);
#149= IFCDIRECTION((1.,0.,0.));
#151= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#153= IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,-38000.));
#155= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#153,#151,#149);
#156= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#158= IFCEXTRUDEDAREASOLID(#148,#155,#156,38000.);
#159= IFCCOLOURRGB($,1.,1.,1.);
#160=
IFCSURFACESTYLERENDERING(#159,0.,IFCNORMALISEDRAIOMEASURE(0.5),$,$,IFCNORMALISEDRAIOMEASURE(0.5),$,.NOTDEFINED.);
#161= IFCSURFACESTYLE('Color_000 (\X2\04380437\X0\
\X2\043A043E043D04320435044004420438044004430435043C043E0433043E\X0\
\X2\043E0431044A0435043A04420430\X0\)',..BOTH.,(#160));
#163= IFCPRESENTATIONSTYLEASSIGNMENT((#161));
#165= IFCSTYLEDITEM(#158,(#163),$);
#168= IFCSHAPE REPRESENTATION(#136,'Body','SweptSolid',(#158));
#175=
IFCPRESENTATIONLAYERASSIGNMENT('X2\041E0423\X0\',$,(#168,#277,#6738),$);
#178= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,(#168));

```

#183=

IFCBUILDINGELEMENTPROXY('15Rt0I5gP6ngWIPVVL1k8g',#12,'\X2\041C043004480438043D043D04380439\X0\ \X2\04370430043B\X0\',\$,\$,#134,#178,'456F7012-16A6-46C6-A812-65F7D506E22A',\$);

#198=

IFCRELCONTAINEDINSPATIALSTRUCTURE('09jEbaE68q03Dlt9KWCVP5',#12,\$,\$,(#183,#283,#6750),#121);

#202= IFCMATERIAL('\X2\04160435043B04350437043E043104350442043E043D\X0\ - \X2\041A043E043D0441044204400443043A04460438043E043D043D044B0439\X0\');

#205= IFCCOLOURRGB(\$,0.498039215686,0.498039215686,0.498039215686);

#206=

IFCSURFACESTYLERENDERING(#205,0.,IFCNORMALISED RATIO MEASURE(1.),\$,\$,\$,IFCNORMALISED RATIO MEASURE(0.26),\$.NOTDEFINED.);

#207= IFCSURFACESTYLE('\X2\041104350442043E043D\X0\ - 02',.BOTH.,(#206));

#209= IFCPRESENTATIONSTYLEASSIGNMENT((#207));

#211= IFCSTYLEDITEM(\$,(#209),\$);

#213= IFCSTYLEDREPRESENTATION(#136,\$,\$,(#211));

#215= IFCMATERIALDEFINITIONREPRESENTATION(\$,\$,(#213),#202);

#219=

IFCRELASSOCIATESMATERIAL('1prswmCKtd8CDhgsEfCIVS',#12,\$,\$,(#183,#283),#202);

#222= IFCPROPERTY SINGLE VALUE('Renovation Status',\$,IFCLABEL('Existing'),\$);

#226=

IFCPROPERTYSET('05LvsbIBuf1N9wMpn5EbPn',#12,'AC\_Pset\_RenovationAndPhasing',\$,(#222));

#231=

IFCRELDEFINESBYPROPERTIES('3uaAzTV6JWySJG464LfzMA',#12,\$,\$,(#183),#226);

#235= IFCCLASSIFICATION('','01',\$,'\X2\041D0411041A\X0\');

#237=

IFCCCLASSIFICATIONREFERENCE(\$,'\X2\041E0423\X0\','\X2\041E0431\X0\''\X2\0454043A0442\X0\''\X2\0423043A0440043804420442044F\X0\''',#235);

#238=

IFCRELASSOCIATESCLASSIFICATION('0k3QF5eBww8X5PQZZe0DwF',#12,'\X2\041D0411041A\X0\ 01',\$,(#183,#283,#6750),#237);

```

#240=
IFCBUILDINGELEMENTPROXYTYPE('2DVjBvroHcsu3E4nzhEz5c',#12,'X2\04160435
043B04350437043E043104350442043E043D\X0\ -
\X2\041A043E043D0441044204400443043A04460438043E043D043D044B0439\X0\
38000',$$,$$,$$,'8D7ED2F9-D724-66DB-80CE-131F6B3BD166',$,,NOTDEFINED.);
#242= IFCRELDEFINESBYTYPE('0aemLx3tgFg7rup9KyaXg6',#12,$$,(#183),#240);
#245= IFCDIRECTION((1.,0.,0.));
#247= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#249= IFCCARTESIANPOINT((263057.217798,-34955.9400263,33000.));
#251= IFCAxis2PLACEMENT3D(#249,#247,#245);
#252= IFCLOCALPLACEMENT(#119,#251);
#253= IFCCARTESIANPOINT((0.,0.));
#255= IFCCARTESIANPOINT((-247684.595605,0.));
#257= IFCCARTESIANPOINT((-247684.595605,-50000.));
#259= IFCCARTESIANPOINT((0.,-50000.));
#261= IFCPOLYLINE((#253,#255,#257,#259,#253));
#263= IFCARBITRARYCLOSEDPROFILEDEF(.AREA.,",#261);
#264= IFCDIRECTION((1.,0.,0.));
#266= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#268= IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,-33000.));
#270= IFCAxis2PLACEMENT3D(#268,#266,#264);
#271= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#273= IFCEXTRUDEDAREASOLID(#263,#270,#271,33000.);
#274= IFCSTYLEDITEM(#273,(#163),$);
#277= IFCSHAPE REPRESENTATION(#136,'Body','SweptSolid',(#273));
#280= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,(#277));
#283=
IFCBUILDINGELEMENTPROXY('29dcLKaJfEXgVbVR2Bhe3c',#12,'X2\041C04300448
0438043D043D04380439\X0\ \X2\04370430043B\X0',$$,$$,#252,#280,'899E6554-913A-
4E86-A7E5-7DB08BAE80E6',$);
#288= IFCPROPERTY SINGLEVALUE('Renovation Status',$,IFCLABEL('Existing'),$);
#289=
IFCPROPERTYSET('0GedgH0bsaJLh4AA71n8ST',#12,'AC_Pset_RenovationAndPhasing',
$,(#288));

```

#291=

IFCRELDEFINESBYPROPERTIES('19yl\$e1S\$8af5Yb5muUmrk',#12,\$,\$,(#283),#289);

#295=

IFCBUILDINGELEMENTPROXYTYPE('1BL8wOxbl22InH4ZYwczuy',#12,'\X2\04160435043B04350437043E043104350442043E043D\X0\ -

\X2\041A043E043D0441044204400443043A04460438043E043D043D044B0439\X0\33000',\$,\$,\$,\$,'4B548E98-EE5B-C209-2C51-1238BA9BDE3C',\$,.NOTDEFINED.);

#296= IFCRELDEFINESBYTYPE('0CdNvR35K7rXcbF\_ZoIQGB',#12,\$,\$,(#283),#295);

#299= IFCDIRECTION((-1.,0.,0.));

#301= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));

#303= IFCCARTESIANPOINT((321010.731775,-4591.35890674,-161835.001693));

#305= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#303,#301,#299);

#306= IFCLOCALPLACEMENT(#119,#305);

#307= IFCCARTESIANPOINT((84772.6948921,-83809.4589964,170540.946944));

#309= IFCCARTESIANPOINT((84772.6948921,-83809.4589964,161835.001693));

#311= IFCCARTESIANPOINT((84772.6948921,-51613.7524978,161835.001693));

#313= IFCCARTESIANPOINT((84772.6948921,-51613.7524978,168219.714343));

#315= IFCCARTESIANPOINT((84772.6948921,-51613.7524978,170540.946944));

#317= IFCPOLYLOOP((#307,#309,#311,#313,#315));

#319= IFCFACEOUTERBOUND(#317,.T.);

#320= IFCFACE((#319));