

П. П. ЛОБОДА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0000-0002-0808-8014

І. С. СТАРОВІТ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0000-0002-6511-4610

РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ І УПРАВЛІННЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ І РАДІАЦІЙНИМ СТАНОМ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТУ ЧАЕС

Новий безпечний конфайнмент (НБК) – це захисна споруда, збудована над існуючим об'єктом «Укриття», яка включає в собі комплекс технологічного обладнання для вилучення зі зруйнованого четвертого енергоблоку Чорнобильської АЕС матеріалів, що містять ядерне паливо, поводження з радіоактивними відходами та інші системи, призначені для здійснення діяльності з перетворення цього енергоблоку на екологічно безпечну систему. Дах та стіни об'єкту «Укриття» мають велику кількість щілин, через які проникає повітря та радіоактивні аерозолі в основний об'єм НБК, а звідти в довкілля. Через перепади температур, які залежать від пори року та режиму роботи персоналу при розбиранні завалів усередині НБК виникають нестационарні термогазодинамічні процеси теплової конвекції та руху повітря. Необхідність управління вологістю повітря для подовження терміну використання НБК та забезпечення радіаційної безпеки вимагають розробки спеціалізованих інформаційних технологій. Метою даної роботи є розробка архітектури програмного забезпечення прогнозування і управління термогазодинамічними процесами і радіаційним станом НБК ЧАЕС на основі технології цифрових двійників. Проведено аналіз архітектури та функціональних можливостей існуючої інтегрованої системи управління НБК. Враховуючи недостатній рівень реалізації потреб у візуалізації та прогнозуванні в ІСУ НБК, зазначено необхідність використання її даних як основи для вирішення задач візуалізації, прогнозу та управління за допомогою цифрового двійника. Визначено основні вимоги до побудови цифрового двійника НБК та на основі огляду основних типів цифрових двійників і наявних підходів до формування їх архітектури представлено узагальнену структурну схему цифрового двійника НБК.

Ключові слова: архітектура програмного забезпечення, цифровий двійник, новий безпечний конфайнмент, прогнозування, управління, термогазодинамічні процеси, радіаційний стан.

P. P. LOBODA

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID: 0000-0002-0808-8014

I. S. STAROVIT

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID: 0000-0002-6511-4610

DEVELOPMENT OF SOFTWARE ARCHITECTURE FOR FORECASTING AND CONTROLLING THERMO-GASDYNAMIC PROCESSES AND THE RADIATION STATE OF THE NEW SAFE CONFINEMENT OF CHNPP

The New Safe Confinement (NSC) is a protective structure built over the existing "Shelter" facility, which includes a complex of technological equipment for the removal of materials containing nuclear fuel, radioactive waste management and other systems from the destroyed fourth power unit of the ChNPP, intended for the implementation of activities for the transformation of this object into an environmentally safe system. The roof and walls of the "Shelter" facility have a large number of cracks through which air and radioactive aerosols penetrate into the main volume of the NSC, and from there into the environment. Unsteady thermo-gasodynamic processes of heat convection and air movement occur due to temperature differences that depend on the season and the work regime of the personnel during the dismantling of rubble inside the NSC. The need to manage air humidity to extend the life of NSC and ensure radiation safety requires the development of specialized information technologies. The purpose of this paper is to develop a software architecture for forecasting and management of thermogas-dynamic processes and the radiation state of the ChNPP based on the technology of digital twins. An analysis of the architecture and functionality of the existing integrated management system (ISM) of the NSC was carried out. Taking into account the insufficient level of implementation of the needs for visualization and forecasting in the ISM of the NSC, the need to use its data as a basis for solving the tasks of visualization, forecasting and management with the help of a digital twin is indicated. The main requirements for the construction of a digital twin of the NSC are determined, and based on an overview of the main types of digital twins and available approaches to the formation of their architecture, a generalized structural diagram of a digital twin of the NSC is presented.

Key words: software architecture, digital twin, new safe confinement, forecasting, management, thermogas-dynamic processes, radiation state.

Постановка проблеми

Світовою спільнотою та державою Україна розроблено і виконується низка заходів, спрямованих на зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС (ЧАЕС) та перетворення її зруйнованого четвертого енергоблоку на екологічно безпечну систему. Для забезпечення виконання цих заходів провідними науковими і інженерними установами світу розроблено і реалізовано амбітний план щодо побудови Нового Безпечного Конфайнменту (НБК) об'єкту «Укриття» (ОУ). НБК – захисна споруда, яка включає в собі комплекс технологічного обладнання для вилучення з зруйнованого четвертого енергоблоку Чорнобильської АЕС 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. Загальний вигляд НБК та ОУ схематично зображено на рисунку 1 [1].

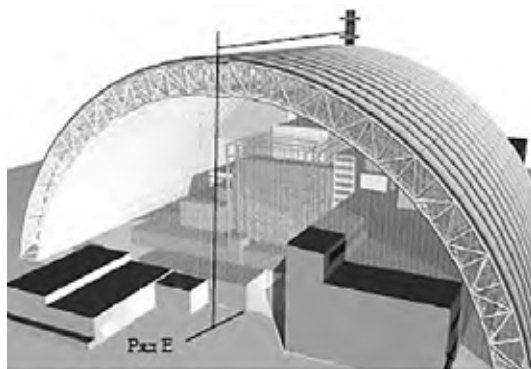


Рис. 1. Загальний вигляд НБК та ОУ

Створення НБК має забезпечити безпеку принаймні найближчі 100 років і досягнення амбітних цілей, серед яких: забезпечення захисту персоналу станції ЧАЕС, населення та навколишнього середовища від впливу джерел ядерної та радіаційної небезпеки, що наразі пов'язанні з самим існуванням НБК; створення необхідних умов для здійснення практичної діяльності з перетворення ОУ на екологічно безпечну систему, а саме вилучення залишків ядерного палива, виконання робіт по поводженню з радіоактивними відходами та демонтажу чи посилення нестабільних конструкцій ОУ.

Основною проблемою НБК є небезпечний вплив підвищеного радіаційного фону в основному об'ємі на персонал, який буде там працювати. Дах та стіни об'єкту «Укриття» мають велику кількість щілин, через які проникає повітря та радіоактивні аерозолі в основний об'єм НБК, а звідти в довкілля. Через перепади температур усередині НБК, які залежать від пори року та режиму роботи персоналу при розбиранні завалів, різних тепловідлень усередині НБК виникають нестаціонарні термогазодинамічні процеси теплової конвекції та руху повітря [1]. Термін використання НБК становить 100 років при умові підтримання в його основному об'ємі певних характеристик вологості повітря, що досягається за рахунок прогнозування та управління термогазодинамічними процесами. Важливість управління вологістю повітря для подовження терміну використання НБК підтверджується графіком залежності швидкості корозії металу конструкцій споруди від відносної вологості повітря, який наведено на рисунку 2 [1]. Крім вологості, НБК потребує контролю та управління великою кількістю інших параметрів для підвищення радіаційної, ядерної, промислової безпеки та безпеки навколишнього середовища, що неможливо без використання сучасних інформаційних технологій, засобів автоматизації та управління. В рамках розробки та супроводження програмного забезпечення для підтримки функціонування НБК залучені провідні інженерні компанії світу та наукові установи України.

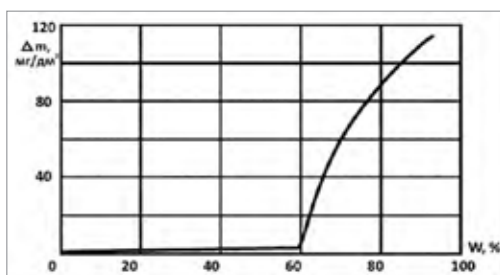


Рис. 2. Залежність швидкості корозії конструкційної сталі від відносної вологості повітря

Враховуючи тривалий плановий термін використання НБК доцільно, спираючись на досвід експлуатації, наявні доробки провідних наукових установ України, доступ до накопичених історичних даних сенсорів та існуючих систем контролю ОУ та НБК ЧАЕС, розпочати розробку програмного забезпечення для подальшого розвитку засобів прогнозу та управління термогазодинамічними процесами і радіаційним станом НБК. Одним з напрямків такої розробки, який розглядається в даній роботі, є створення Цифрового двійника НБК ОУ ЧАЕС (ЦД НБК).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як показано в існуючих роботах, прогнозування та управління станом НБК можливо виконати за допомогою сучасних методів комп'ютерного моделювання з використанням CFD (Computational Fluid Dynamics) моделей, що адекватно описують необхідні фізичні процеси, які відбуваються в НБК у різних умовах [1]. Наприклад, побудовані моделі, які за допомогою експлуатаційних вимірювань дозволили визначити безперервні неорганізовані витрати повітря з радіоактивними аерозолями за межі НБК в оточуюче середовище при довільних напрямках та швидкостях вітру [2], розглянуті питання розробки спеціального програмного і математичного забезпечення для прогнозування і управління вентиляційними установками НБК [3]. Запропоновано підходи до побудови архітектури інформаційних технологій НБК з врахуванням підсистеми прогнозування прогнозів місць і концентрацій радіоактивних аерозолів на основі сучасних підходів до управління життєвим циклом програмного забезпечення [4]. Недоліком наведених вище робіт є те, що вони в основному створені як вузькоспрямовані моделі (наприклад, тільки для аналізу об'ємного розподілу гамма-випромінювання), а також в основному не враховують спільну 3D геометрію ОУ та НБК, розподіл концентрації РА в основному об'ємі НБК, осідання РА на поверхнях під НБК та багато іншого.

Необхідність поєднання обробки історичних даних щодо НБК, їх візуалізації, розв'язання задач прогнозування та управління визначає доцільність використання технології цифрових двійників для подальшого удосконалення його інформаційних систем.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розробка архітектури програмного забезпечення прогнозування і управління термогазодинамічними процесами і радіаційним станом НБК ЧАЕС на основі технології цифрових двійників. Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз архітектури та функціональних можливостей існуючої інтегрованої системи управління (ІСУ) НБК, сформулювати вимоги до цифрового двійника та визначити його тип, розробити багаторівневу архітектуру цифрового двійника НБК.

Викладення основного матеріалу дослідження

Функціонування цифрового двійника НБК має спиратися на наявну інфраструктуру збору та обробки інформації, яка реалізована в існуючій інтегрованій системі управління та 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. ІСУ НБК виконує наступні основні функції [1]:

- збір, обробка (включаючи статистичний аналіз), передача, реєстрація, запис та зберігання інформації, отриманої від інформаційних систем нижнього рівня;
- зручне для користувача відображення даних;
- повтор для користувача заходів та аварійних сигналів, що подаються з підсистем контролю (ПСК), реєстрація часу появи заходів та аварійних сигналів;
- централізоване відображення контрольованих параметрів та інформації щодо доступності кожної ПСК;
- отримання, реєстрація та виконання запитів користувача по роботі з інформацією (пошук обраних графічних зображень, введення та зміна даних у базі даних і т.д.);
- інформаційне забезпечення користувача шляхом надання доступу як до внутрішніх, так і до зовнішніх джерел інформації;
- самотестування, у тому числі контроль стану елементів системи верхнього рівня, каналів та ліній зв'язку;
- відновлення інформації від ПСК до інтегрованої бази даних (БД) системи після відновлення нормального режиму роботи.

Після закінчення будівництва НБК ІСУ було інтегровано з раніше розробленою інтегрованою інформаційною системою контролю та інтегрованою базою даних ОУ.

Архітектура ІСУ виконана дворівневою, розподіленою, відкритою, що має функціональну конфігурацію, яка дозволяє керувати будь-якою підсистемою незалежно від інших систем [1]. 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.).

ІСУ являє собою розподілену за технологічним, функціональним та територіальним принципом систему, в яку інтегруються системи контролю та управління (СКУ) різного призначення та функцій, серед яких [5]:

- основних кранів;
- радіаційного контролю;
- електропостачання та електрообладнання;
- опалення, вентиляції та кондиціонування повітря;
- поводження з рідкими радіоактивними відходами;
- будівельних конструкцій та сейсмічного контролю;
- внутрішнього транспорту.

Наведені СКУ 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.

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.

Необхідність доповнення існуючої функціональності ІСУ НБК можливостями візуалізації та прогнозування для управління термодинамічними процесами та радіаційним станом НБК обумовлює необхідність використання технології цифрових двійників.

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 [6, 7]. 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) [8]. На нашу думку, найбільш ефективним типом для управління НБК є цифровий двійник з двонаправленим обміном даними. Існують декілька підходів до побудови архітектури таких цифрових двійників. Як правило, цифровий двійник має багаторівневу архітектуру, яка містить механізми вимірювання та обміну даними з реальним об'єктом, локальну базу даних та сховище даних, засоби моделювання, обробки та аналізу даних [9, 10]. Однак НБК є складною системою з багаторівневою структурою, яку необхідно брати до відома при вирішенні задач прогнозу та управління, що не враховано в існуючих роботах та вимагає розробки нових підходів до побудови архітектури цифрового двійника.

Метою розробки цифрового двійника є забезпечення ефективного вирішення задач моніторингу та прогнозування стану НБК ЧАЕС і прийняття рішень щодо управління ним. Виходячи з цієї мети та враховуючи специфіку об'єкту автоматизації, можна сформулювати основні вимоги до архітектури цифрового двійника. 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. Враховуючи високу складність об'єкту автоматизації, для врахування ризиків проекту розробка та впровадження цифрового двійника має відбуватися на основі моделі еволюційного життєвого циклу [4], використовуючи переваги мікросервісної архітектури для реалізації функціональних модулів системи. Модулі цифрового двійника мають реалізовувати функції візуалізації, прогнозування, аналізу та підтримки прийняття рішень для основних підсистем ІСУ НБК (перелік функцій залежить від особливостей функціональних підсистем).

Виходячи з наведених вимог, запропонована архітектура цифрового двійника НБК ЧАЕС, наведена у вигляді структурної схеми на рисунку 3.

Як видно на рисунку 3, архітектура цифрового двійника НБК містить п'ять рівнів. 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.

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.

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.

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.

Бібліотека алгоритмів має забезпечувати обробку даних, їх інтелектуальний аналіз та прийняття рішень.

Бази даних та знань призначені для зберігання інформації щодо результатів прогнозування та прийняття рішень, продукційних правил та інших компонентів для інтелектуального аналізу інформації. Їх структура визначається при вирішенні конкретних завдань з аналізу та управління НБК.

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.

Система версіонування призначена для відстеження змін в ключових даних та параметрах моделей, зберігання історії результатів прогнозів, прийнятих рішень, сформованих електронних документів тощо.

Система управління змінами програмного забезпечення має давати можливість керування проектами модифікацій цифрового двійника, автоматизації тестування, контролю інтеграції та розгортання.

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 пропонуємо включити:

- 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.

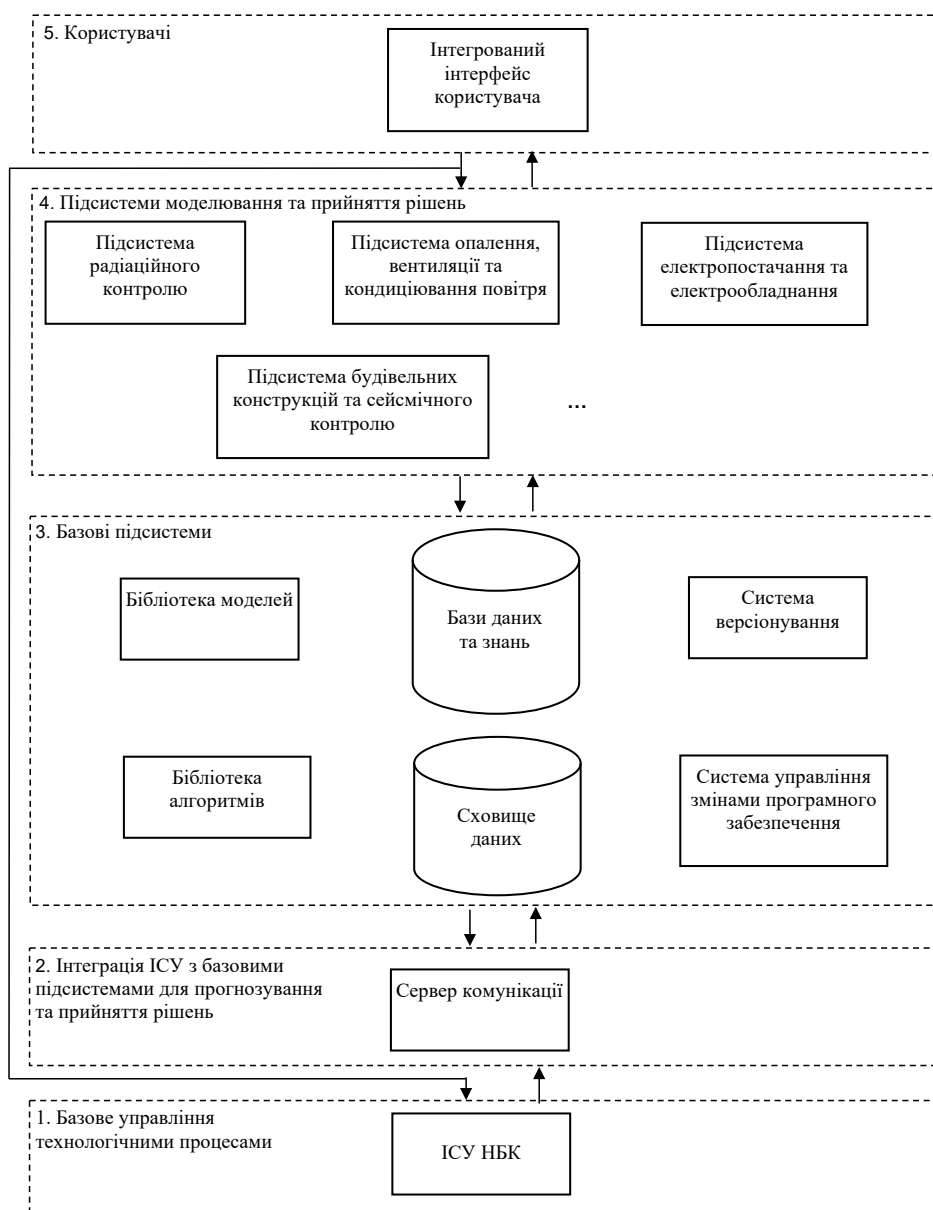


Рис. 3. Узагальнена архітектура цифрового двійника НБК ЧАЕС

Підсистеми моделювання та прийняття рішень в загальному випадку можуть мати модульну структуру, до складу якої входять модулі:

- візуалізації поточного та прогнозного стану;
- аналізу та формування звітності;
- класифікації та прогнозу стану;
- 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.

На верхньому рівні цифрового двійника знаходиться інтегрований інтерфейс користувача, що має забезпечувати роботу з підсистемами в залежності від налаштувань прав доступу користувачів.

З метою підвищення рівня кібербезпеки для функціонування цифрового двійника НБК ЧАЕС слід використовувати закриту локальну інформаційну мережу.

Висновки

В даній роботі розроблено архітектуру програмного забезпечення для вирішення задач прогнозування і управління термогазодинамічними процесами та радіаційним станом НБК ЧАЕС на основі технології цифрових двійників.

Проведено аналіз архітектури та функціональних можливостей існуючої інтегрованої системи управління НБК. Враховуючи недостатній рівень реалізації потреб у візуалізації та прогнозуванні в ІСУ НБК, зазначено необхідність використання її даних як основи для вирішення задач візуалізації, прогнозу та управління за допомогою цифрового двійника.

Визначено основні вимоги до побудови цифрового двійника НБК та на основі огляду основних типів цифрових двійників і наявних підходів до формування їх архітектури представлено узагальнену структурну схему цифрового двійника НБК.

Розроблена архітектура цифрового двійника НБК 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, прогнозування та управління термогазодинамічними процесами та радіаційним станом НБК. Для створення модулів цифрового двійника пропонується використати архітектуру мікросервісів з застосуванням захищених протоколів обміну даними, що дасть змогу гнучко розширювати його функціональні можливості.

Список використаної літератури

1. Новый безопасный конфайнмент Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации): монография / Круковский П.Г., Метель М.А., Скляренко Д.И. и др.; Под ред. П.Г. Круковского, В.А. Краснова, В.П. Сулимова/ Киев, ООО «Франко Пак», 2019. – 300 с. ISBN 978-966-97864-7-0.
2. П.Г. Круковский, С.В. Дядюшко, Д.І. Скляренко, І.С. Старовіт. Неорганізовані викиди повітря з радіоактивними аерозолями із нового безпечного конфайнмента ЧАЕС в оточуюче середовище. *Питання атомної науки і техніки*. 2021. №6. С. 181-186. DOI:10.46813/2021-136-181.
3. Pysmennyu, Y., Navtylko, Y., Krukovskiy, P., Starovit, I., Diadiushko, Y. (2022). Розробка спеціального програмного математичного забезпечення управління вентиляційними установками нового безпечного конфайнмента ЧАЕС. *Nuclear & radiationsafety*, 2(94) 2022, С. 35–43, DOI: DOI:10.32918/nrs.2022.2(94).04.
4. 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 (pp. 43–57).
5. Новый безопасный конфайнмент. Интегрированная система управления. Проект ИСУ. Пояснительная записка: (Отчет) / СП НОВАРКА. – SIP-N-AC-22-B2172- TEN-200-01.
6. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. Springer, 2017. P. 85–113.
7. 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. DOI:10.2514/5.9781624105654.0175.0200.
8. Kritzing 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.
9. Lu Y., Liu C., Wang K. I-K., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2020. Vol. 61, P. 1–14. DOI:10.1016/j.rcim.2019.101837.
10. Alam, K. M., El Saddik, A. C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE Access*, 2017, Vol. 5. P. 2050–2062. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2657006.

References

1. New safe confinement of the Chernobyl nuclear power plant (calculation-experimental analysis in design and operation): monograph/ Krukovsky P.G., Metel M.A., Sklyarenko D.I. etc.; Ed. P.G. Krukovsky, V.A. Krasnova, V.P. Sulymova/ Kyiv, LLC "Franko Pak", 2019. 300 p. ISBN 978-966-97864-7-0.
2. 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.
3. 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: DOI:10.32918/nrs.2022.2(94).04.
4. 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 (pp. 43–57).
5. New safe confinement. Integrated management system. ISM project. Explanatory note: (Report) / SP NOVARKA. – SIP-N-AC-22-B2172-TEN-200-01.
6. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. Springer, 2017. P. 85–113.
7. 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. DOI:10.2514/5.9781624105654.0175.0200.
8. 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.
9. Lu Y., Liu C., Wang K. I-K., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2020. Vol. 61, P. 1–14. DOI:10.1016/j.rcim.2019.101837.
10. Alam, K. M., El Saddik, A. C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE Access*, 2017, Vol. 5. P. 2050–2062. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2657006.