

МОДЕЛЬ БАЗИ ДАНИХ ТА ЗНАНЬ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТУ ЧАЕС

Лобода П. П.

аспірант

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

просп. Перемоги, 37, Київ, Україна

orcid.org/0000-0002-0808-8014

Lobodapetr@gmail.com

Старовіт І. С.

аспірант

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

просп. Перемоги, 37, Київ, Україна

orcid.org/0000-0002-6511-4610

ivanstarovit@gmail.com

Ключові слова: *новий безпечний конфайнмент, цифровий двійник, модель бази даних, програмне забезпечення.*

З метою ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській атомній електростанції для захисту від розповсюдження радіаційного забруднення та ізоляції зруйнованого енергоблока була збудована захисна споруда, яку назвали «об'єкт Укриття». Плановий термін використання «об'єкта Укриття» становить лише 30 років, тому було виконане проектування та будівництво нової спеціальної споруди, яка отримала назву «Новий безпечний конфайнмент» (НБК). Особливості функціонування НБК вимагають підтримання заданих характеристик вологості повітря в його основному об'ємі, що потребує реалізації управління термогазодинамічними процесами споруди. Також потребують моніторингу, прогнозування та управління значна кількість інших процесів НБК для дотримання радіаційної безпеки та безпеки довкілля. Одним з варіантів вирішення такої задачі є розробка цифрового двійника НБК ЧАЕС. У цій роботі сформовані підходи до побудови моделі бази даних та знань цифрового двійника НБК ЧАЕС. Аналіз характеристик наявної інтегрованої системи управління НБК показав, що її функціональні можливості не дозволяють повною мірою виконувати візуалізацію даних, прогнозування стану НБК та підтримку прийняття рішень. Тому було запропоновано для вирішення зазначених задач застосувати технологію цифрових двійників. Огляд класів цифрових двійників та сучасних підходів до проектування їх архітектури дозволив визначити основні складники інформації цифрового двійника НБК, серед яких виділено результати вимірювань величин, що характеризують його стан з прив'язкою до 3D-координат, моделі та результати прогнозування й ідентифікації їх параметрів, алгоритми та затвержені рішення ОПР, моделі знань для підтримки прийняття рішень. Виконана формалізація основних інформаційних об'єктів НБК та зв'язків між ними з використанням апарату теорії множин. Множини та відношення моделі використані як основа для побудови структури бази даних та знань цифрового двійника. Результати роботи дають змогу розробити програмне забезпечення цифрового двійника НБК ЧАЕС для вирішення задач візуалізації та прогнозування його стану, підтримки прийняття рішень щодо управління термогазодинамічними процесами з метою належного захисту населення та довкілля й перетворення «об'єкта Укриття» на екологічно безпечну систему.

DATABASE AND KNOWLEDGE MODEL OF THE DIGITAL TWIN OF THE NEW SAFE CONFINEMENT OF THE CHNPP

Loboda P. P.

Postgraduate Student
National Technical University of Ukraine
“Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Peremohy Ave, 37, Kyiv, Ukraine
orcid.org/0000-0002-0808-8014
Lobodapetr@gmail.com

Starovit I. S.

Postgraduate Student
National Technical University of Ukraine
“Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Peremohy Ave, 37, Kyiv, Ukraine,
orcid.org/0000-0002-6511-4610
ivanstarovit@gmail.com

Key words: *new secure confinement, digital double, database model, software.*

In order to eliminate the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant, a protective structure called the “Shelter Object” was built to protect against the spread of radiation pollution and to isolate the destroyed power unit. The planned term of using of the “Shelter facility” is only 30 years, therefore, the design and construction of a new special facility, which was named “New Safe Confinement” (NSC), was completed. The peculiarities of the operation of the NSC require maintenance of the specified characteristics of air humidity in its main volume, which requires the implementation of management of thermogas-dynamic processes of the building. A significant number of other NSC processes also require monitoring, forecasting and management to comply with radiation safety and environmental safety. One of the options for solving this problem is the development of a digital twin of the NSC of the ChNPP. In this work, approaches to building a database and knowledge model of a digital twin of the NSC of the ChNPP are formed. Analysis of the characteristics of the existing integrated management system of the NSC showed that its functionality does not allow to fully perform data visualization, forecasting of the state of the NSC and decision-making support. Therefore, it was proposed to use the technology of digital twin to solve these problems. An overview of the classes of digital twins and modern approaches to the design of their architecture made it possible to determine the main components of the information of the NSC digital twin, among which the results of measurements of quantities characterizing its state with reference to 3D coordinates, models and results of forecasting and identification of their parameters, algorithms and approved user decisions, knowledge models to support decision-making. The formalization of the main information objects of the NSC and the connections between them was carried out using the apparatus of set theory. The sets and relations of the model are used as the basis for building the database and knowledge structure of the digital twin. The results of the work make it possible to develop software for the digital twin of the NSC ChNPP to solve the problems of visualization and forecasting of its condition, supporting decision-making regarding the management of thermogas-dynamic processes in order to properly protect the population and the environment, and to transform the “Shelter Object” into an ecologically safe system.

Вступ. Під час ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС) для ізоляції зруйнованого енергоблока була збудована захисна споруда, яку назвали «об'єкт Укриття» (ОУ). З огляду на обмежений термін використання ОУ нашою державою за підтримки світової спільноти було виконане проектування та будівництво нової спеціальної споруди, яка отримала назву «Новий безпечний конфайнмент» (НБК). Схематично загальний вид НБК та ОУ в поперечному розрізі представлено на рисунку 1 [1].

Як можна зрозуміти з рисунку 1, НБК має забезпечити захист персоналу ЧАЕС, населення та навколишнього середовища від ядерної та радіоактивної небезпеки шляхом контролю над витокami радіоактивного пилу зі зруйнованого реактора ЧАЕС та ОУ, надавши змогу вилучити з них радіоактивні матеріали та проводити інші заходи для перетворення ОУ на екологічно безпечну систему [2].

Термін використання НБК, який було здано в експлуатацію у 2019 році, становить 100 років за умови підтримання заданих характеристик вологості повітря в його основному об'ємі, що вимагає реалізації управління термогазодинамічними процесами споруди. Також потребують моніторингу, прогнозування та управління значна кількість інших процесів НБК для дотримання радіаційної безпеки та безпеки довкілля. Одним з варіантів вирішення такої задачі є розробка цифрового двійника НБК ЧАЕС.

Метою цієї роботи є розробка підходів до побудови моделі бази даних та знань цифрового двійника НБК ЧАЕС для вирішення задач візуалізації та прогнозування його стану, підтримки прийняття рішень щодо управління термогазодинамічними процесами НБК.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- провести аналіз наявних підходів до управління НБК та наявних інформаційних систем;
- формалізувати основні множини об'єктів НБК та зв'язки між ними для відображення у структурах даних цифрового двійника;
- сформувати структуру основних таблиць бази даних та визначити її узагальнену структуру.

Огляд літератури. НБК є складною інженерною спорудою, що містить велику кількість обладнання, під яким знаходиться ОУ зі зруйнованим реактором, в якому перебуває велика кількість радіоактивних матеріалів. Природно, що НБК та ОУ потребують контролю та управління великою кількістю параметрів з метою підвищення радіаційної, ядерної, промислової безпеки та безпеки навколишнього середовища, підвищення аварійної готовності та інтегрування систем контролю в єдину автоматизовану систему. Для контролю та управління цими параметрами була спроектована та використовується так звана інтегрована система управління (ІСУ) НБК.

ІСУ спроектована за ієрархічним принципом та має два рівні. Нижній рівень містить підсистеми контролю (ПСК). Кожна ПСК складається з певної кількості пристроїв зв'язку з об'єктом, які отримують дані від датчиків та пристрою збору даних, що збирає та відображає ці дані. Верхній рівень – це інтегрована система контролю, яка функціонує як інформаційна система. Такий мережевий сегмент структурований для забезпечення зв'язку між робочими станціями ІСУ, інтегрованою базою даних ОУ та сервером ІСУ [2]. Однак накопичені з датчиків дані у системі не мають прив'язки до просторових координат НБК, що не дозволяє повноцінно здійснювати візуалізацію інформації. Недостатній рівень вирішення в

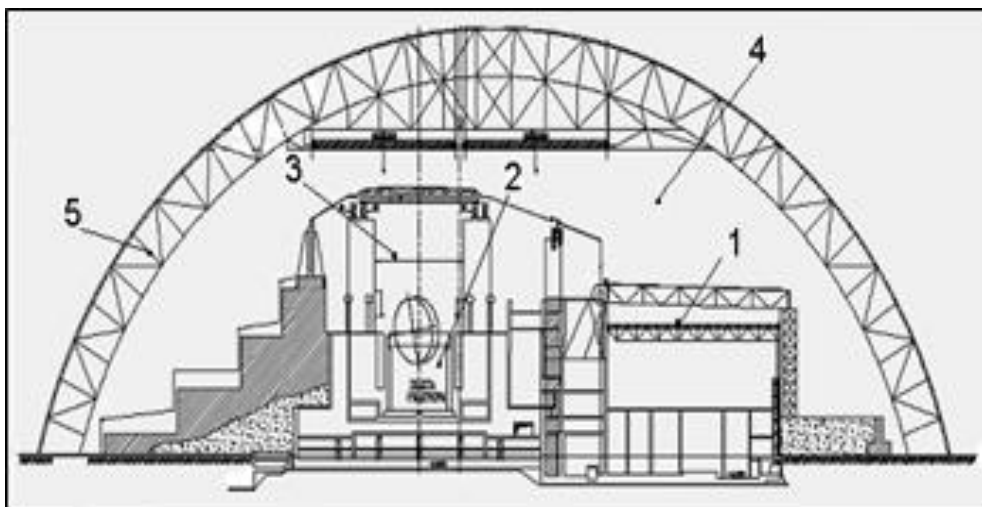


Рис. 1. Схема НБК та ОУ у поперечному розрізі: 1 – турбінна зала, 2 – зруйнований реактор, 3 – центральна зала, 4 – основний об'єм та 5 – кільцевий простір НБК [1]

ІСУ задач візуалізації даних, прогнозування стану НБК та підтримки прийняття рішень робить актуальним подальший розвиток інформаційних систем НБК.

Прогнозування процесів та стану НБК можна реалізувати на основі сучасних методів комп'ютерного моделювання з використанням CFD (Computational Fluid Dynamics) моделей. Наприклад, уже існують моделі, що на базі експлуатаційних вимірювань розраховують безперервні неорганізовані витоки повітря з радіоактивними аерозолями за межі споруди НБК за заданих напрямків і швидкостей вітру [1], запропоновано підходи до розробки математичного та програмного забезпечення для реалізації управління вентиляцією НБК [3]. Представлено пропозиції щодо побудови архітектури комп'ютерних систем НБК з включенням підсистеми прогнозування концентрацій радіоактивних аерозолів та підсистеми управління версіями програмного забезпечення [4]. До недоліків представлених вище робіт можна віднести те, що здебільшого вони містять вузькоспрямовані моделі й не враховують загальну 3D-геометрію НБК, розподіл й осідання радіоактивних аерозолів в основному об'ємі НБК.

Потреба в розширенні наявних функцій ІСУ НБК можливостями візуалізації даних та прогнозування основних процесів для управління НБК зумовлює доцільність застосування технології цифрових двійників.

Цифровим двійником називають віртуальний прототип реального фізичного об'єкта, виробу, групи виробів чи процесу, який виконує збір та повторне використання цифрової інформації. Цифрові двійники за призначенням можна розділити на класи цифрових двійників-прототипів, двійників-екземплярів та цифрових двійників-агрегатів, що складаються з кількох двійників-екземплярів [5]. За характером зв'язку між об'єктом та його цифровим двійником можна виділити цифрові моделі (обмін даними між об'єктом та двійником відсутній), цифрові тіні (тільки отримують дані з об'єкта) та, власне, цифрові двійники (реалізований двонаправлений обмін даними) [6]. Відповідно до сучасних підходів до побудови цифрових двійників до їх складу входять засоби вимірювання і обміну даними з об'єктом, база даних і знань, сховище даних та засоби їх аналізу, моделі та алгоритми обробки інформації [7]. На нашу думку, для управління процесами НБК необхідно вибрати цифровий двійник з двонаправленим обміном даними.

Методи. Виходячи з наявного рівня автоматизації контролю процесів НБК, ІСУ НБК має входити як система нижнього рівня до його цифрового двійника. З огляду на те, що в ІСУ НБК уже реалізовано збір та первинну обробку даних,

структури даних цифрового двійника мають бути інтегровані з ІСУ для їх отримання, а також мають містити інформацію щодо моделювання, прогнозування та прийнятих рішень. 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:

- 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 над рівнем моря розташування датчика $d \in D$, де D – множина датчиків НБК. З огляду на те, що в межах ІСУ задачі моніторингу та управління НБК розподілені по різних підсистемах, 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. У базі даних цифрового двійника НБК має зберігатися інформація про тип і поточні налаштування датчика $d \in D$ (точка розташування $p \in P$, установки, дата останньої повірки й т.п.), історія зміни його зазначених характеристик.

Для представлення результатів вимірювання будемо використовувати кортеж:

$$r=(t, p, d, s, v, tr), \quad (1)$$

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 $v \in V$ у 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:

$$F_{kuv}: (UV \times UV) \rightarrow K_{uv} \quad (2)$$

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

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

Множину моделей M цифрового двійника можна представити у вигляді:

$$M = \cup m_i, \quad (3)$$

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 у цифровому двійнику має зберігатися ознака, чи є вона адекватною.

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:

$$mr = (t, nmr, m_i, us, VMVI_i, VMVO_i, VMP_i), \quad (4)$$

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 (1), якщо вимірювання по цих величинах $MVI_i \subseteq V$ 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, результати якої можуть бути представлені у вигляді кортежу:

$$mp = (t, nmp, m_i, a_j, us, VMVI_i, VMVOF_i, VMVO_i, VMP_i, CA_j), \quad (5)$$

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 у разі виконання алгоритму a_j .

За аналогією з множиною моделей M множину алгоритмів A цифрового двійника можна представити у вигляді:

$$A = \cup a_j, \quad (6)$$

де a_j – алгоритм з номером j .

Аналогічно до моделей 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 у системі того, якщо деяка модель алгоритму не є адекватною.

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:

$$ar = (t, nar, a_j, us, VAVI_j, VAVO_j), \quad (7)$$

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 у базі даних цифрового двійника можна використовувати кортежи виду:

$$pr=(t, npr, z_i, s, us, VZV_i), \quad (8)$$

де pr – кортеж з відношення результатів затверджених рішень PR ; t – момент часу з точністю до секунди; npr – унікальний номер затвердженого рішення; z_i – задача з множини задач Z ; s – система НБК, для якої приймалося рішення; us – користувач, який прийняв або затвердив рішення, з множини користувачів $USERS$; VZV_i – значення величин рішення з множини $ZV_i \subseteq V$ для задачі z_i .

Для того щоб порівняти затвержене 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 $RZA(Z,A) = \{(z_i, a_j)\}$, де задача z_i розв'язується за допомогою алгоритму a_j .

В алгоритмах підтримки прийняття рішень можуть використовуватися знання, представлені у вигляді звичайних або нечітких продукційних правил. Формальне представлення цих знань та їх структури даних можна реалізувати відповідно до методики, наведеної у [8]. Позначимо MK множини 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 .

Спираючись на наведену формалізацію основних об'єктів цифрового двійника НБК та зв'язки між ними, спроектована базова модель його бази даних та знань представлена у вигляді концептуальної ER схеми на рисунку 2.

Як видно на рисунку 2, на основі формалізованих множин та відношень сформовані структури даних та знань цифрового двійника НБК.

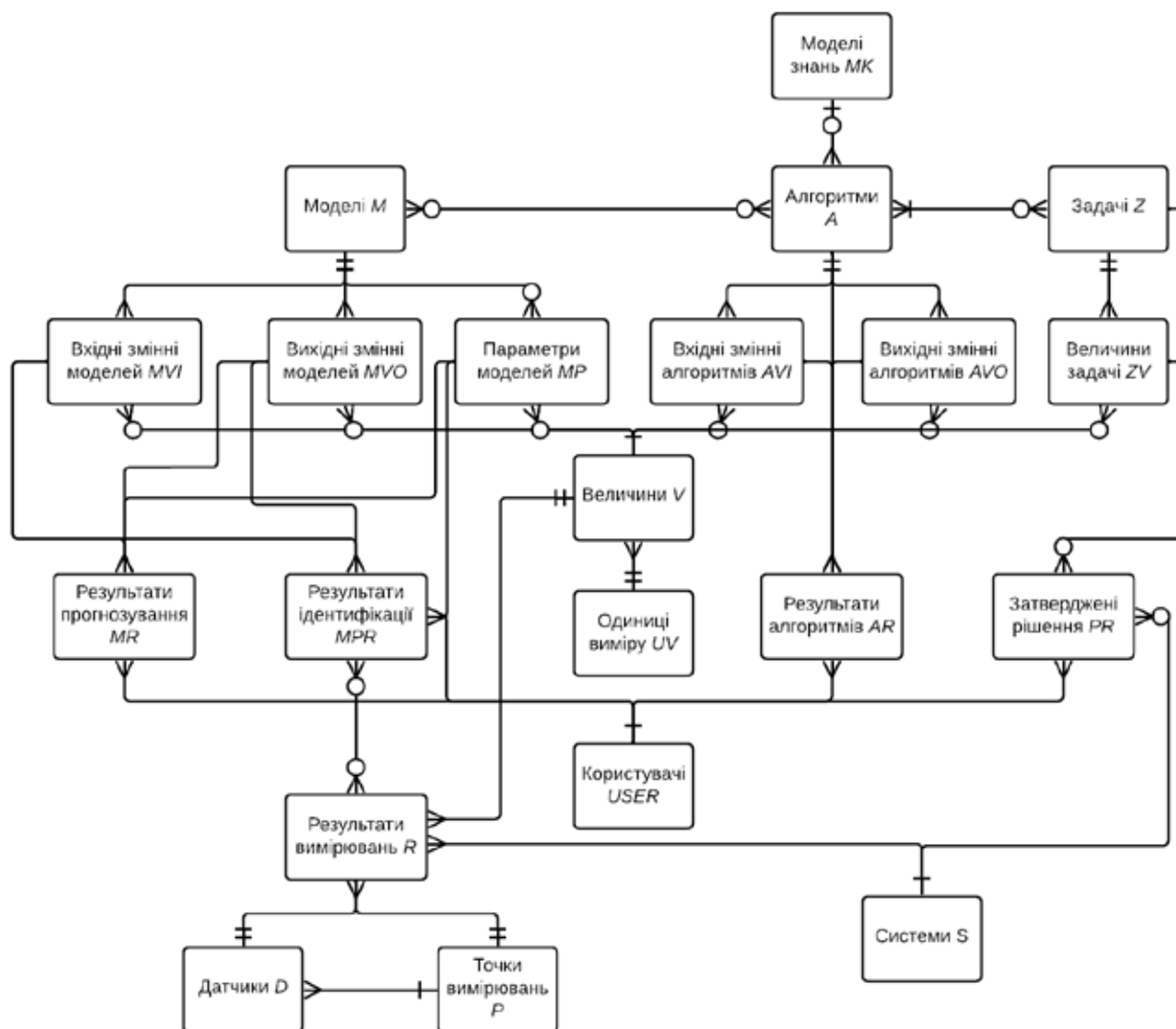


Рис. 2. Концептуальна модель бази даних та знань цифрового двійника НБК

Висновки. У цій роботі сформовані підходи до побудови моделі бази даних та знань цифрового двійника НБК ЧАЕС.

Аналіз характеристик наявної інтегрованої системи управління НБК показав, що її функціональні можливості не дозволяють повною мірою виконувати візуалізацію даних, прогнозування стану НБК та підтримку прийняття рішень. Тому було запропоновано для вирішення зазначених задач застосувати технологію цифрових двійників. Огляд класів цифрових двійників та сучасних підходів до проєктування їх архітектури дозволив визначити основні складники інформації цифрового двійника НБК, серед яких виділено результати вимірювань величин, що характеризують його стан з прив'язкою до 3D-координат, моделі та

результати прогнозування й ідентифікації їх параметрів, алгоритми та затвержені рішення ОПР, моделі знань для підтримки прийняття рішень. Виконана формалізація основних інформаційних об'єктів НБК та зв'язків між ними з використанням апарату теорії множин. Множини та відношення моделі використані як основа для побудови структури бази даних та знань цифрового двійника.

Результати роботи дають змогу розробити програмне забезпечення цифрового двійника НБК ЧАЕС для вирішення задач візуалізації та прогнозування його стану, підтримки прийняття рішень щодо управління термогазодинамічними процесами з метою належного захисту населення та довкілля й перетворення «об'єкта Укриття» на екологічно безпечну систему.

ЛІТЕРАТУРА

1. Круковський П.Г., Дядюшко Є.В., Скляренко Д.І., Старовіт І.С. Неорганізовані викиди повітря з радіоактивними аерозолями із нового безпечного конфайнменту ЧАЕС у навколишнє середовище. *Питання атомної науки і техніки*. 2021. № 6. С. 181–186. DOI: 10.46813/2021-136-181.
2. 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.
3. Pysmennyu Y., Havrylko Y., Krukovskiy P., Starovit I., Diadiushko Y. Розробка спеціального програмного математичного забезпечення управління вентиляційними установками нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Nuclear & radiation safety*. 2022. 2(94). С. 35–43. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2\(94\).04](https://doi.org/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 and practical Conference, MODS, 2021 June 28–July 01, Chernihiv, Ukraine*, pp. 43–57.
5. 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.
6. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC Papers OnLine*. 2018. Vol. 51. Issue 11. P. 1016–1022.
7. 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.
8. Шушура О.М. Структури даних інформаційної технології нечіткого управління на основі функцій належності багатьох аргументів. *Зв'язок*. 2018. № 1. С. 21–24.

REFERENCES

1. Krukovskiy, P.G., Dyadyushko, E.V., Sklyarenko, D.I., Starovit, I.S. (2021). 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*. No. 6, pp. 181–186.
2. Krukovskiy, P.G., Metel, M.A., Sklyarenko, D.I. (2019). *New safe confinement of the Chernobyl nuclear power plant (calculation-experimental analysis in design and operation)*. Kyiv: LLC “Franko Pak” [in Russian].
3. Pysmennyu, Y., Havrylko, Y., Krukovskiy, 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 & radiation safety*. Vol. 2. No. 94, pp. 35–43.
4. Bernd Kratz, Florian Wieduwilt, Maxim Saveliev. (2021). 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 and practical Conference (Ukraine, Chernihiv, June 28 – July 01, 2021)*, Chernihiv: MODS, pp. 43–57.

5. Grieves, M. (2019). Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 175–200.
6. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC Papers OnLine*. Vol. 51, Issue 11, pp. 1016–1022.
7. Lu Y., Liu C., Wang K.I-K., Huang H., Xu X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. Vol. 61, pp. 1–14.
8. Shushura, O.M. (2018). Information technology data structures of fuzzy control based on multi-argument membership functions. *Zvjazok*. No. 1, pp. 21–24.