

П. П. ЛОБОДА

аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-0808-8014

І. С. СТАРОВІТ

аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-6511-4610

МОДЕЛЮВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТУ ЧАЕС НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

Для захисту населення та оточуючого середовища від наслідків аварії на ЧАЕС у 1986 році була побудована спеціальна споруда під назвою «об'єкт Укриття». Враховуючи, що «об'єкт Укриття» був розрахований на використання лише протягом 30 років, було побудовано та введено у 2019 році в експлуатацію нову захисну споруду, названу «Новий безпечний конфайнмент» (НБК). Ця споруда ізолювала «об'єкт Укриття» від навколишнього середовища та забезпечила можливість його перетворення на екологічно-безпечну систему. Однією з основних задач управління НБК є запобігання витоків повітря з його основного об'єму до навколишнього середовища через наявні протічки та систему вентиляції при виникненні нестационарних термогазодинамічних процесів під впливом вітру та перепадів температури. Для моніторингу та управління процесами НБК була розроблена спеціалізована багаторівнева інформаційна система. Однак необхідність візуалізації інформації щодо стану НБК, забезпечення підтримки прийняття рішень та автоматизації управління його процесами обумовлює актуальність розробки нових інформаційних технологій. Для вирішення даної задачі доцільно застосувати сучасну технологію цифрових двійників. Метою даної роботи є розробка підходів до управління системою вентиляції НБК та проектування і моделювання програмного забезпечення цифрового двійника для їх реалізації. Проведено аналіз наявних підходів до управління вентиляційними установками НБК та запропоновано метод його автоматизації шляхом застосування засобів нечіткого управління та штучних нейронних мереж на основі масиву статистичної інформації щодо прийнятих персоналом рішень. Створено моделі програмного забезпечення цифрового двійника НБК у вигляді діаграм UML. Результати роботи можуть бути використані під час розробки цифрового двійника НБК для підтримки прийняття рішень щодо управління його процесами та навчання персоналу.

Ключові слова: новий безпечний конфайнмент, цифровий двійник, управління вентиляцією, модель програмного забезпечення.

P. P. LOBODA

Postgraduate Student at the Department of Software Engineering
for Power Industry
National Technical University of Ukraine
“Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-0808-8014

I. S. STAROVIT

Postgraduate Student at the Department of Software Engineering
for Power Industry
National Technical University of Ukraine
“Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-6511-4610

SIMULATION AND MANAGEMENT OF PROCESSES OF THE NEW SAFE CONFINEMENT OF CHNPP BASED ON THE TECHNOLOGY OF DIGITAL TWINS

To protect the population and the surrounding environment from the consequences of the accident at the CHNPP, a special building called the “Shelter facility” was built in 1986. Considering that the “Shelter facility” was designed to be used only for 30 years, a new protective construction named “New Safe Confinement” (NSC) was built and put into operation in 2019. This structure isolated the “Shelter object” from the environment and provided the possibility of its transformation into an ecologically safe system. One of the main tasks of NSC management is to prevent air leaks from its

main volume to the environment through existing leaks and the ventilation system in the event of non-stationary thermo-gas-dynamic processes under the influence of wind and temperature changes. A specialized multi-level information system was developed to monitor and manage NSC processes. However, the need to visualize information about the state of the NSC, provide support for decision-making and automate the management of its processes determines the urgency of developing new information technologies. To solve this problem, it is advisable to use the modern technology of digital twins. The purpose of this paper is the development of approaches to the management of the ventilation system of the NSC and the design and software modeling of the digital twin for their implementation. An analysis of existing approaches to the management of NSC ventilation systems was carried out and a method of its automation was proposed through the use of fuzzy control tools and artificial neural networks based on an array of statistical information regarding the decisions made by the staff. Software models of the NSC's digital twin have been created in the form of UML diagrams. The results of the paper can be used during the development of a digital twin of the NSC to support decision-making regarding the management of its processes and staff training.

Key words: new safe confinement, digital twin, ventilation control, software model.

Постановка проблеми

Після аварії на ЧАЕС у 1986 році для захисту населення та довкілля від її наслідків була побудована спеціальна споруда під назвою «об'єкт Укриття». Враховуючи, що «об'єкт Укриття» був розрахований на використання лише протягом 30 років, нашою державою за допомогою світового співтовариства було побудовано та введено у 2019 році в експлуатацію нову захисну споруду, названу «Новий безпечний конфайнмент» (НБК). На рисунку 1 схематично представлено загальний вид НБК та ОУ в поперечному розрізі [1].

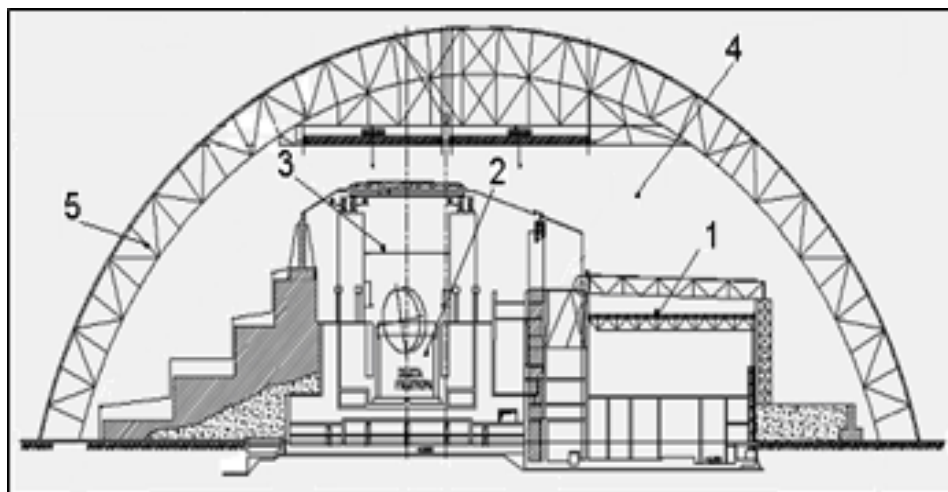


Рис. 1. Схема НБК та ОУ у поперечному перерізі: 1 – турбінна зала; 2 – зруйнований реактор; 3 – центральна зала; 4 – основний об'єм та 5 – кільцевий простір НБК [1]

Як видно з рисунку 1, НБК ізолював «об'єкт Укриття» від навколишнього середовища та забезпечив можливість проведення робіт з його перетворення на екологічно-безпечну систему. Для моніторингу та управління процесами НБК була розроблена спеціалізована багаторівнева інформаційна система, однак рішення щодо управління вентиляційними установками приймаються оператором. Необхідність візуалізації інформації щодо стану НБК, забезпечення підтримки прийняття рішень та автоматизації управління його процесами обумовлює актуальність розробки нових інформаційних технологій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Слід зазначити, що НБК є надвеликою складною інженерною спорудою, яка облаштована різноманітним обладнанням та устаткуванням, що має забезпечити його функціонування протягом 100 років. Однією з основних задач управління НБК є запобігання витоків повітря з його основного об'єму разом з радіоактивними аерозолями до навколишнього середовища через наявні протічки при виникненні під впливом вітру та перепадів навколишньої температури нестационарних термогазодинамічних процесів. Розроблено моделі з використанням CFD (Computational Fluid Dynamics) моделей та штучних нейронних мереж для оцінки неорганізованих витрат повітря з радіоактивними аерозолями за межі НБК в оточуюче середовище при довільних напрямках і швидкостях вітру [1], запропоновано модель оцінки тисків всередині НБК та підходи до управління гідравлічними потоками при умові відключення вхідних вентиляційних установок, що забезпечують мінімізацію витрат електроенергії та неконтрольованих викидів повітря з радіоактивними аерозолями [2]. Для реалізації прогнозування місць та концентрацій радіоактивних аерозолів в НБК розроблено варіант архітектури інформаційної системи з врахуванням

потреби версіонування програмного забезпечення [3]. Потрібно зазначити, що представлені результати націлені на окремі процеси НБК й не дозволяють реалізувати комплексне управління його станом. Одним з варіантів вирішення цієї задачі є застосування технології цифрових двійників. В загальному розумінні цифровий двійник – це віртуальний прототип реального фізичного об'єкту, виробу, групи виробів чи процесу, який виконує збір та повторне використання цифрової інформації [4, 5]. Запропоновано архітектуру цифрового двійника НБК ЧАЕС [6], моделі структури його бази даних та знань [7]. Необхідно розглянути питання застосування цифрових двійників в задачі управління термогазодинамічними процесами НБК.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розробка підходів до управління системою вентиляції НБК та проектування і моделювання програмного забезпечення цифрового двійника для їх реалізації. Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз наявних підходів до управління вентиляційними установками НБК та розробити метод його автоматизації, виконати проектування і моделювання програмного забезпечення цифрового двійника.

Викладення основного матеріалу дослідження

При управлінні вентиляційними системами НБК ставляться задачі мінімізації 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. Під час проектування НБК були оцінені теоретичні значення площ протічок на початку та в кінці 100-річного строку експлуатації об'єкту, однак в 2017–2018 рр. були проведені гідравлічні тести та попередньо оцінені наявні площі протічок, що вже на той час значно перевищували значення площ протічок, які мають бути в кінці терміну експлуатації НБК. Прогнозується, що значення наявних площ протічок з часом будуть також суттєво збільшуватись [1]. На рисунку 2 представлено умовну гідравлічну схему перетікання повітряних мас НБК [2].

Як видно на рисунку 2, повітряні маси надходять до КП та ОО та видаляються з них системою вентиляційних установок, розташованих на його циліндричній поверхні, східній та західній стіні, також наявний рух повітряних мас через протічки, розмір яких точно не визначено.

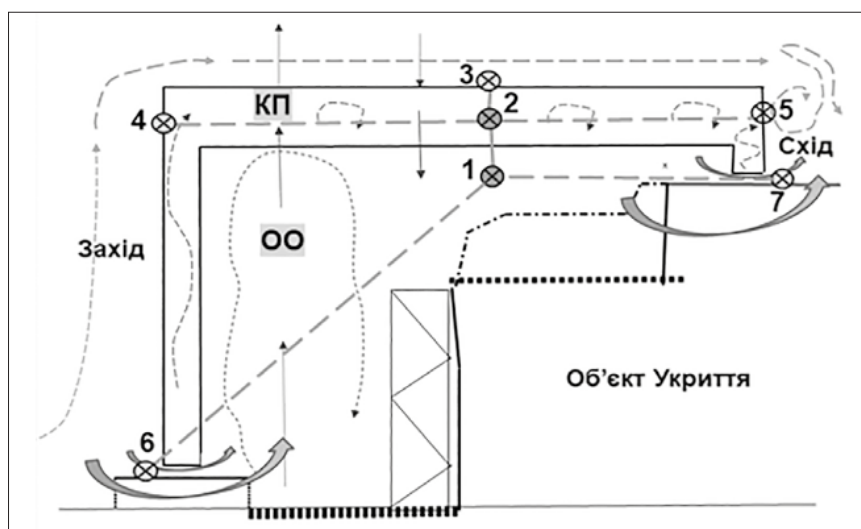


Рис. 2. Умовна гідравлічна схема перетікання повітряних мас НБК у поздовжньому перерізі: 1 – вузол ОО, 2 – вузол КП, 3 – вузол на зовнішній циліндричній поверхні, 4 – вузол на зовнішній поверхні західної стіни, 5 – вузол на зовнішній поверхні східної стіни, 6 – вузол на зовнішній частині західних протічок,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

Особи, що керують вентиляційними установками НБК, приймають рішення щодо обсягів витрат повітря, виходячи з поточних даних про тиски в ОО й КП, витрати вентиляторів в КП та ОО, та про кліматичні умови (напрямок та швидкість вітру).

Для створення цифрового двійника НБК необхідно розробити метод автоматизації управління його вентиляційними установками. Враховуючи складність процесу та наявність невизначеності, при вирішенні цієї задачі доцільно використовувати інтелектуальні інформаційні технології з елементами нечіткої логіки [8]. Оскільки наявний великий масив історичних даних щодо прийнятих рішень з управління системою вентиляції, можна застосувати методи нейро-нечіткого моделювання. Беручи до уваги аналіз підходів до нейро-нечіткого моделювання, для вирішення задачі обрано адаптивну систему нейро-нечіткого виводу ANFIS, реалізовану засобами MATLAB [9].

Основними показниками, які визнаються особами, що приймають рішення з управління системою вентиляції НБК, є витрати повітря для КП та ОО. На рисунку 3 представлено структуру модуля управління витратами повітря КП, побудовану в редакторі ANFIS.

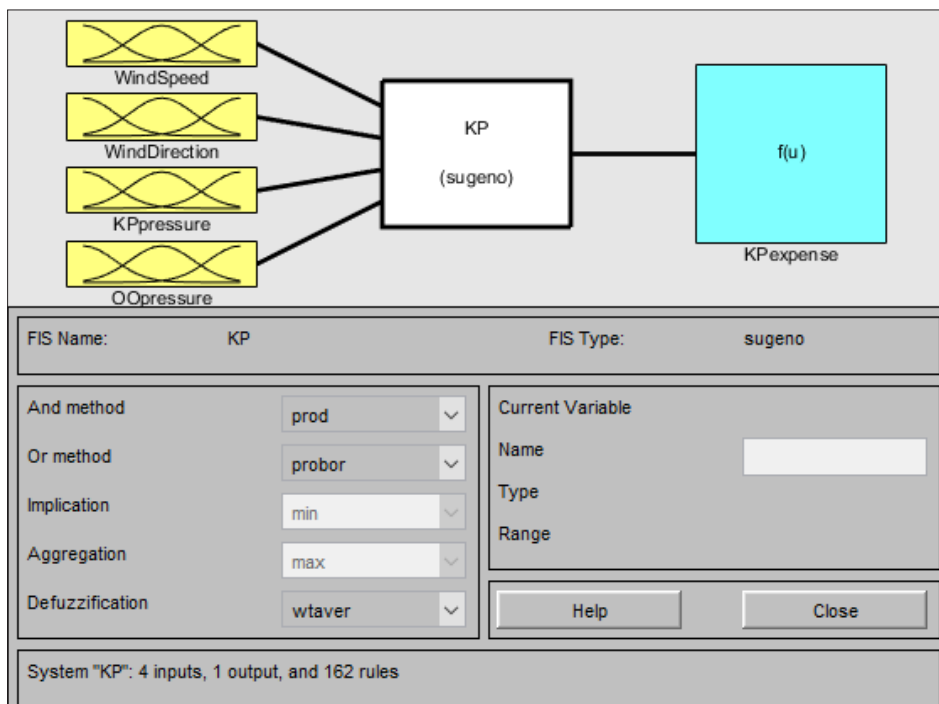


Рис. 3. Структура модуля управління витратами повітря КП

Як видно на рисунку 3, витрати повітря КП визначаються швидкістю та напрямом вітру, перепадами тиску КП та ОО з оточуючим середовищем. Під час навчання моделі управління на основі статистичних даних було сформовано 162 правила нечіткого логічного виведення, що дозволяють розраховувати на основі методу Сугено значення витрат повітря КП. Результати навчання нейро-нечіткої моделі наведено на рисунку 4.

Як видно на рисунку 4, навчання здійснювалося гібридним методом оптимізації, який дозволив отримати показник середньоквадратичної точності 0,50196, що відповідає відносній похибці приблизно у 3,7%. Перевірка на контрольній вибірці даних показала відносну похибку, рівну 3,2%, що свідчить про адекватність та можливість використання нейро-нечіткої моделі на практиці.

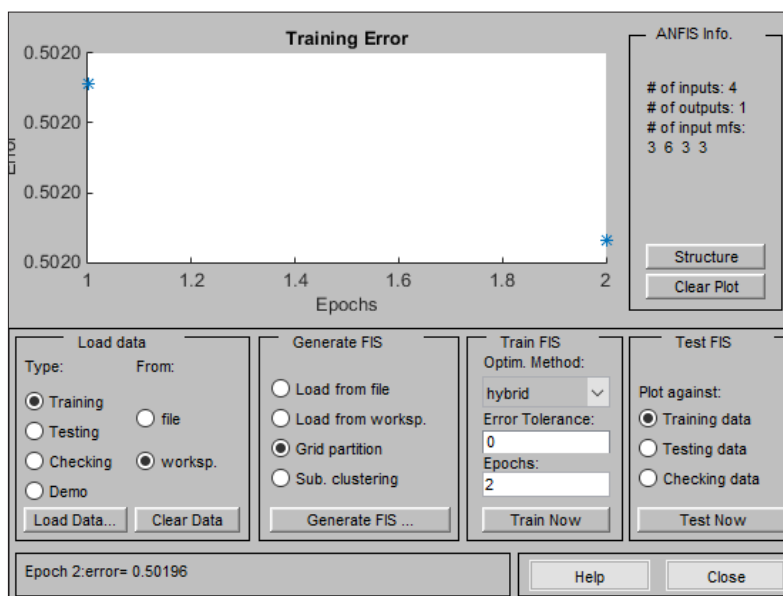


Рис. 4. Результати навчання нейро-нечіткої моделі для управління витратами повітря КП

Метод автоматизації управління вентиляційними установками НБК для визначення витрат повітря КП полягає в застосуванні методу Сугено нечіткого логічного виведення на основі отриманих в результаті нейро-нечіткого моделювання термів лінгвістичних змінних, їх функцій належності та бази правил нечітких продукцій. Управління витратами повітря ОО здійснюється аналогічним чином.

Для реалізації запропонованого методу управління вентиляцією НБК на основі технології цифрових двійників необхідно розробити програмне забезпечення. Під час проектування програмного забезпечення сформовано його моделі у вигляді діаграм UML. У якості прикладу на рисунку 5 наведено діаграму прецедентів UML цифрового двійника НБК.

Як видно на рисунку 5, основними користувачами цифрового двійника є виробничий персонал та особи, що приймають рішення, розробники його моделей та алгоритмів, адміністратори системи.

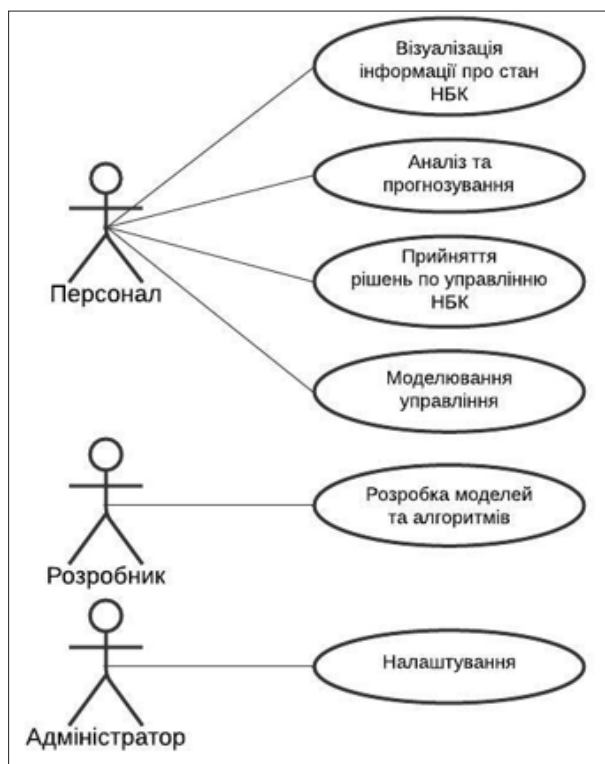


Рис. 5. Узагальнена діаграма прецедентів цифрового двійника НБК

Відповідно до представленої в [6] архітектури цифрового двійника, він може бути використаний для візуалізації інформації стосовно поточного стану НБК, підтримки прийняття рішень щодо керування його підсистемами та для навчання персоналу, дозволяючи, наприклад, моделювати процеси управління.

Висновки

В даній роботі сформовані підходи до управління системою вентиляції НБК та проектування і моделювання програмного забезпечення цифрового двійника для їх реалізації.

Аналіз існуючих підходів до управління вентиляцією показав, що 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 вентиляцією було вирішено використати нейро-нечітке моделювання на основі набору статистичних даних. Розроблено метод нейро-нечіткого управління витратами вентиляційних установок НБК на основі адаптивної системи нейро-нечіткого виводу ANFIS, результати тестування підтвердили високий рівень адекватності моделей. Для практичної реалізації запропонованого методу на основі технології цифрових двійників проведено проектування та моделювання його програмного забезпечення з використанням діаграм UML.

Результати роботи закладають основу для розробки програмного забезпечення цифрового двійника НБК, який дозволяє вирішувати задачі підтримки прийняття рішень щодо управління його процесами з метою захисту населення та довкілля, візуалізувати інформацію про стан НБК, проводити моделювання діяльності НБК під час навчання виробничого персоналу ЧАЕС.

Список використаної літератури

1. П.Г. Круковський, Є.В. Дядюшко, Д.І. Склярєнко, 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.
2. Pysmennyu, Y., Havrylko, Y., Krukovskiy, P., Starovit, I., Diadiushko, Y. (2022). Розробка спеціального програмного математичного забезпечення управління вентиляційними установками нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Nuclear & radiationsafety*. 2022. 2(94). С. 35–43, [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2\(94\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2(94).04).
3. 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).
4. 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.
5. 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.
6. Лобода П.П., Старовіт І.С. Розробка архітектури програмного забезпечення прогнозування і управління термогазодинамічними процесами радіаційним станом Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Технічні науки*. № 4(83). 2022. С. 67–73. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.9>
7. Лобода П.П., Старовіт І.С. Модель бази даних та знань цифрового двійника Нового безпечного конфайнменту ЧАЕС. *Computer Science and Applied Mathematic*. № 2. 2022. С. 50–57. <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2022-2-06>
8. Шушура О. М., Сторчак К.П., Бондарчук А.П., Золотухіна О.А. Формалізація задачі управління в інтелектуальних інформаційних технологіях на принципах нечіткої логіки. *Зв'язок*. 2019. № 3. С. 3–7.
9. Viharos Z., Kis K. Survey on Neuro-Fuzzy systems and their applications in technical diagnostics and measurement. *Measurement*. 2015. № 67. с. 126–136. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.02.001.

References

1. P.G. Krukovskiy, E.V. Dyadyushko, D.I. Sklyarenko, I.S. Starovit. (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*, 6, 181–186.
2. 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 & radiationsafety*, 2(94), 35–43.
3. 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-practical Conference (Ukraine, Chernihiv, June 28 – July 01, 2021)*, Chernihiv: MODS, pp. 43–57.
4. Grieves M. (2019) Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 175–200.
5. 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*, 61, 1–14.
6. Loboda P.P., Starovit I.S. (2022) Development of software architecture for forecasting and management of thermogasdynamic processes and the radiation state of the New Safe Confinement of the ChNPP. *Bulletin of the Kherson National Technical University. Technical sciences*, 4(83), 67–73.
7. Loboda P.P., Starovit I.S. (2022) Model of the database and knowledge of the digital double of the New Safe Confinement of the ChNPP. *Computer Science and Applied Mathematic*, 2, 50–57.
8. Shushura O.M., Storchak K.P., Bondarchuk A.P., Zolotukhina O.A. (2019) Formalization of the management task in intelligent information technologies based on the principles of fuzzy logic. *Zvyazok*, 3, 3–7.
9. Viharos Z., Kis K. (2015) Survey on Neuro-Fuzzy systems and their applications in technical diagnostics and measurement. *Measurement*, 67, 126–136.