УДК 681.5

І. А. Поліщук; В. Ю. Гуменюк

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК

У статті виконано аналіз сучасних підходів до застосування технології цифрових двійників у енергетичних системах та досліджено перспективи їх використання для підвищення ефективності експлуатації когенераційних установок. Розглянуто результати останніх наукових досліджень із застосуванням цифрових двійників для систем генерації електричної та теплової енергії, розподіленої енергетики і систем теплопостачання. Вказано, що більшість наявних рішень орієнтована на моніторинг окремих енергетичних об'єктів, прогнозування технічного стану обладнання або оптимізацію окремих технологічних процесів. Водночас питання створення інтегрованих цифрових двійників когенераційних систем, які поєднують моделі енергетичного обладнання, теплових мереж, алгоритми прогнозування та засоби підтримки прийняття рішень у межах єдиного цифрового середовища, залишається недостатньо дослідженим.

У роботі розроблено архітектуру інтегрованого цифрового двійника когенераційної установки Jenbacher JMS 624 GS-N.L. Запропонована архітектура базується на використанні сучасних засобів промислової автоматизації, хмарних технологій та методів машинного навчання. Накопичення та обробка даних реалізовані із застосуванням сервісів AWS IoT SiteWise та AWS IoT SiteWise Edge, що забезпечують централізоване зберігання часових рядів і формування інформаційної моделі технологічного обладнання. Для створення цифрового представлення фізичного об'єкта використано AWS IoT TwinMaker з використанням прогнозних та аналітичних функцій Amazon SageMaker.

Виконано аналіз можливостей використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування технологічних параметрів. Розглянуто моделі прогнозування часових рядів DeepAR, регресійні моделі на основі XGBoost та алгоритми виявлення аномалій Random Cut Forest. Обґрунтовано доцільність застосування моделей часових рядів для прогнозування споживання природного газу, електричного навантаження та коефіцієнта надлишку повітря, оскільки зазначені параметри характеризуються часовою залежністю та циклічністю зміни значень.

Запропонований цифровий двійник забезпечує можливість моніторингу технічного стану обладнання в режимі реального часу, прогнозування технологічних параметрів, виявлення аномальних режимів роботи, підтримки прийняття рішень та оптимізації режимів експлуатації когенераційної установки. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого впровадження систем прогнозного технічного обслуговування, інтелектуального керування та підвищення енергоефективності об'єктів розподіленої генерації.

Ключові слова: *цифровий двійник, когенераційна установка, енергетичні системи, машинне навчання, оптимізація режимів роботи, прогнозне технічне обслуговування*

Вступ

Когенерація або комбіноване виробництво теплової та електричної енергії є одним із найбільш ефективних способів використання паливних ресурсів у сучасній енергетиці. Завдяки одночасному виробництву електроенергії та тепла в межах єдиного технологічного циклу когенераційні установки забезпечують високий коефіцієнт корисної дії та сприяють зменшенню витрат палива й викидів парникових газів. У сучасних умовах розвитку розподіленої генерації, інтеграції відновлюваних джерел енергії та підвищення вимог до енергетичної безпеки когенераційні системи розглядаються як важливий елемент стійкої та гнучкої енергетичної інфраструктури.

Ефективність роботи когенераційних установок значною мірою залежить від якості систем

керування та здатності враховувати зміну навантаження, стан обладнання, параметри теплової мережі та економічні фактори. Традиційні системи автоматизації забезпечують моніторинг і керування технологічними процесами, однак мають обмежені можливості щодо прогнозування поведінки системи та оптимізації її роботи в умовах невизначеності.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності експлуатації енергетичних об’єктів є використання технології цифрових двійників [1 – 5]. Цифровий двійник являє собою віртуальну модель фізичного об’єкта, яка поєднує математичні моделі, дані реального часу та аналітичні алгоритми для відображення поточного стану системи, прогнозування її поведінки та підтримки прийняття рішень. Застосування цифрових двійників у когенераційних системах відкриває можливості для оптимізації режимів роботи, прогнозування несправностей, підвищення надійності обладнання та більш ефективного використання енергетичних ресурсів.

Таким чином, актуальним є дослідження сучасних підходів до побудови цифрових двійників для когенераційних установок, аналіз їхніх можливостей та обмежень, а також визначення перспектив створення інтегрованих рішень, орієнтованих на підвищення ефективності та гнучкості роботи систем комбінованого виробництва теплової та електричної енергії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розвиток засобів збору даних, промислового Інтернету речей, хмарних обчислень та методів штучного інтелекту створив передумови для широкого впровадження цифрових двійників у системах генерації, передачі та розподілу енергії [1]. Сучасні дослідження розглядають цифровий двійник як комплексну кіберфізичну систему, що поєднує фізичний об’єкт, його математичну модель, інформаційні потоки та аналітичні сервіси в єдиному цифровому середовищі [2, 3]. Автори також підкреслюють важливість поєднання фізично обґрунтованих моделей із методами машинного навчання для підвищення точності прогнозування та адаптації до реальних умов експлуатації.

Практичну цінність використання цифрових двійників для енергетичних об'єктів продемонстровано у дослідженні [4], де цифрова модель теплоелектростанції використана для аналізу енергетичних та економічних показників роботи установки. Отримані результати вказують на можливість виявлення причин втрати ефективності та вибору оптимальних режимів експлуатації залежно від навантаження і ринкових умов.

Аналіз сучасних досліджень у сфері генерації електроенергії показує, що цифрові двійники найчастіше використовуються для прогнозного технічного обслуговування обладнання, оптимізації режимів роботи, виявлення несправностей та моделювання різних сценаріїв експлуатації енергетичних установок [5].

Значна увага в сучасних дослідженнях приділяється поєднанню цифрових двійників із алгоритмами прогнозного керування та штучного інтелекту. Роботи [6, 7] демонструють можливість використання цифрових моделей для прогнозування навантаження, формування керуючих впливів та пошуку оптимальних режимів роботи розподілених енергетичних систем. Особливо перспективним напрямком є інтеграція цифрових двійників із методами підкріплювального навчання, що дозволяє адаптувати систему керування до змінних умов експлуатації.

Дослідження [8, 9] показують, що цифрові двійники можуть використовуватися не лише для окремих енергетичних об'єктів, але й для координації роботи складних енергетичних систем, які включають джерела генерації, накопичувачі енергії та споживачів.

Важливим напрямом розвитку цифрових двійників є їх застосування в системах теплопостачання. Так, у роботі [10] представлено реалізацію цифрового двійника для лабораторії, який забезпечує інтеграцію моделей джерел теплової енергії, теплової мережі та споживачів. Такий підхід демонструє можливість переходу від моделювання окремих енергетичних об'єктів до створення комплексних цифрових моделей енергетичних систем.

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують ефективність використання цифрових двійників для вирішення широкого спектра задач в енергетиці для моніторингу, діагностики, прогнозного керування та оптимізації режимів роботи. Водночас аналіз літературних джерел показав відсутність комплексних підходів, орієнтованих на інтеграцію моделей когенераційної установки, теплової мережі, прогнозних алгоритмів та економічних показників у межах єдиного цифрового середовища. Тому актуальним є розроблення архітектури інтегрованого цифрового двійника когенераційної системи, здатного забезпечити підвищення ефективності та якості прийняття рішень під час її експлуатації.

Мета і завдання статті

Метою статті є розробка концепції та архітектури інтегрованого цифрового двійника когенераційної установки для моніторингу технічного стану обладнання, прогнозування режимів роботи та підвищення ефективності виробництва теплової й електричної енергії.

Для цього необхідно виконати наступні завдання:

- виконати аналіз сучасних підходів до застосування цифрових двійників у когенераційних та енергетичних системах;
- розробити архітектуру інтегрованого цифрового двійника когенераційної установки;
- визначити основні технологічні параметри, необхідні для формування цифрового двійника;
- проаналізувати можливість використання моделей машинного навчання для прогнозування технологічних параметрів;
- оцінити перспективи застосування цифрового двійника для оптимізації режимів роботи та прогнозного технічного обслуговування.

Розробка архітектури цифрового двійника когенераційної установки

Ефективне використання технології цифрових двійників у когенераційних системах вимагає інтеграції даних технологічного процесу, математичних моделей обладнання та засобів аналітичної обробки інформації в межах єдиного цифрового середовища. На відміну від традиційних систем моніторингу, цифровий двійник повинен не лише відображати поточний стан об’єкта, а й забезпечувати можливість прогнозування його поведінки, оцінювання ефективності роботи та підтримки прийняття рішень під час експлуатації.

Враховуючи виявлені недоліки наявних рішень та необхідність комплексного врахування технологічних і експлуатаційних параметрів когенераційних систем, у роботі розроблено архітектуру інтегрованого цифрового двійника когенераційної установки. Як об'єкт дослідження розглядається газопоршнева установка Jenbacher JMS 624 GS-N.L. Під час проєктування архітектури було проаналізовано можливості сучасних хмарних платформ, зокрема Amazon Web Services (AWS) та Microsoft Azure, які мають необхідні засоби для побудови цифрових двійників промислових об'єктів. Для реалізації запропонованого рішення було обрано платформу AWS, оскільки вона забезпечує комплекс спеціалізованих сервісів для збору, накопичення, моделювання, аналізу та візуалізації промислових даних у межах єдиної екосистеми, з підтримкою локальної попередньої обробки даних за допомогою AWS IoT SiteWise Edge. В основу архітектури покладено ієрархічний багаторівневий підхід із розподілом на фізичний, інформаційний та прикладний сегменти. Рівень фізичної інфраструктури охоплює безпосередньо когенераційну установку, технологічний контур утилізації тепла, комплекс допоміжних агрегатів, а також інтегровані засоби вимірювання та моніторингу технологічних параметрів. Інформаційний та прикладний сегменти реалізовані із використанням хмарних сервісів Amazon, що забезпечує гнучке керування потоками даних та масштабування функціональних можливостей цифрового двійника. На рис. 1 наведено архітектуру розробленого цифрового двійника.

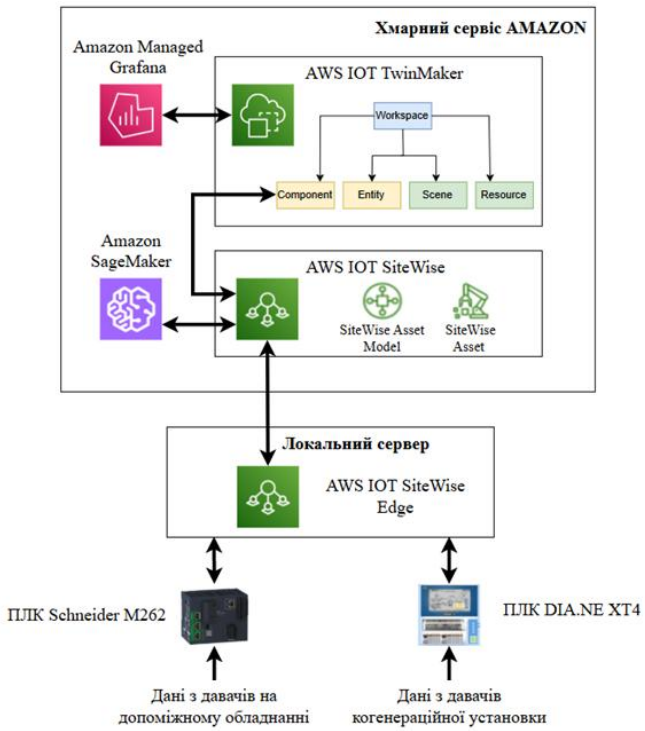

Рис. 1. Загальна архітектура інтегрованого цифрового двійника когенераційної установки

Інтеграція даних для цифрового двійника розпочинається на рівні програмованих логічних контролерів (ПЛК). Основним джерелом технологічної інформації є контролер DIA.NE XT4, який забезпечує збір даних про параметри роботи газового двигуна, електрогенератора, систем охолодження та утилізації тепла. Додатково використовується контролер Schneider Electric Modicon M262, що виконує моніторинг допоміжного обладнання та елементів теплової мережі. Обмін даними між контролерами та локальним сервером здійснюється за допомогою промислового протоколу Modbus TCP із використанням захищених каналів зв’язку.

На локальному сервері розгорнуто шлюз AWS IoT SiteWise Edge, який виконує функції збору, накопичення та попередньої обробки даних. Використання цього компонента дозволяє забезпечити безперервність роботи системи навіть у випадку тимчасової втрати зв’язку з хмарною інфраструктурою. Також його вбудований функціонал виконує фільтрацію сигналів, агрегування даних та їх перетворення до уніфікованого формату для подальшого використання компонентами цифрового двійника.

Після первинної обробки дані передаються до сервісу AWS IoT SiteWise, де формується інформаційна модель когенераційної установки. У межах цієї моделі створюються цифрові представлення основного обладнання, технологічних вузлів та контрольованих параметрів. Фактично AWS IoT SiteWise виконує роль централізованого сховища часових рядів і забезпечує єдиний рівень доступу до технологічної інформації для всіх компонентів цифрового двійника.

Для реалізації функцій прогнозування та інтелектуального аналізу використовується сервіс Amazon SageMaker. На основі накопичених експлуатаційних даних формуються моделі прогнозування теплового навантаження, оцінювання паливної ефективності установки, виявлення аномальних режимів роботи та прогнозування технічного стану обладнання. Результати роботи моделей повертаються до цифрового двійника та використовуються для підтримки прийняття рішень під час експлуатації когенераційної системи.

Інтеграція технологічних даних, аналітичних моделей та інформації про фізичний об'єкт виконується засобами AWS IoT TwinMaker. Цей сервіс формує структуроване цифрове представлення когенераційної установки, поєднуючи дані реального часу з AWS IoT SiteWise та результати аналітичних розрахунків із SageMaker. У межах цифрового двійника створюються окремі компоненти, що описують газовий двигун, генератор, теплові контури,

паливну систему та допоміжне обладнання, що дозволяє відображати взаємозв'язки між окремими підсистемами установки.

Для візуалізації інформації цифрового двійника використовується сервіс Amazon Managed Grafana, на інформаційних панелях якого відображаються поточні значення технологічних параметрів, історичні тренди, показники ефективності роботи установки, результати прогнозних моделей та повідомлення про можливі відхилення від нормальних режимів експлуатації.

Функціональні можливості цифрового двійника когенераційної установки

Запропонована архітектура цифрового двійника забезпечує не лише централізований збір та зберігання технологічних даних, але й створює основу для реалізації функцій моніторингу, прогнозування, діагностики та оптимізації режимів роботи когенераційної установки.

Для формування цифрового двійника використовуються технологічні параметри, що характеризують як стан основного обладнання, так і ефективність процесів виробництва теплової та електричної енергії. У таблиці 1 наведений перелік основних технологічних параметрів, які використовуються для цифрового двійника.

Таблиця 1

Основні технологічні параметри цифрового двійника когенераційної установки

Група параметрів	Вимірювальні технологічні параметри	Призначення
Електричні параметри	Активна потужність генератора, напруга, струм, частота мережі	Аналіз ефективності виробництва електроенергії та оцінка режимів навантаження
Паливні параметри	Витрата природного газу, тиск газу, коефіцієнт надлишку повітря	Контроль процесу згоряння та оцінка паливної ефективності
Теплотехнічні параметри	Температура подаючого та зворотного теплоносія, теплова потужність, температура вихлопних газів	Формування теплового балансу та оцінка ефективності утилізації тепла
Параметри двигуна	Температура мастила, температура охолоджувальної рідини, тиск мастила, навантаження двигуна	Моніторинг технічного стану та прогнозування деградації обладнання
Експлуатаційні параметри	Напрацювання двигуна, кількість запусків та зупинок, режими роботи установки	Планування технічного обслуговування та оцінка ресурсу обладнання
Діагностичні параметри	Попереджувальні повідомлення, аварійні сигнали, журнали подій	Виявлення відхилень та аналіз причин виникнення несправностей

Однією з ключових переваг цифрового двійника є можливість використання накопичених експлуатаційних даних для прогнозування режимів роботи обладнання та підтримки прийняття рішень. На відміну від традиційних систем моніторингу, цифровий двійник не обмежується відображенням поточного стану установки, а дозволяє оцінювати можливі зміни технологічних параметрів і прогнозувати їх вплив на ефективність роботи когенераційної системи.

Прогнозування та оптимізація режимів роботи когенераційної установки

Серед доступних сервісів Amazon SageMaker було проаналізовано можливість використання моделей прогнозування часових рядів DeepAR, регресійних моделей на основі XGBoost та алгоритмів виявлення аномалій Random Cut Forest. Враховуючи, що більшість технологічних параметрів когенераційної установки збираються з певною періодичністю, для реалізації функцій прогнозування обрано підхід на основі моделей часових рядів. На відміну від класичних регресійних моделей, такі алгоритми враховують залежність між послідовними значеннями параметрів та дозволяють описувати циклічні зміни навантаження, характерні для систем теплопостачання і когенераційних установок.

Основними прогнозними змінними цифрового двійника є теплова потужність установки, споживання природного газу, коефіцієнт надлишку повітря та електричне навантаження генератора. Прогнозування цих параметрів дозволяє завчасно оцінювати ефективність майбутніх режимів роботи та формувати рекомендації щодо вибору оптимального навантаження когенераційної установки.

Особливо корисну інформацію для прогнозування надає коефіцієнт надлишку повітря. Цей параметр безпосередньо впливає на ефективність згоряння паливо-повітряної суміші, а його відхилення від оптимального діапазону призводить до зростання питомих витрат природного газу, зниження ККД двигуна та погіршення екологічних характеристик установки.

На основі прогнозованих параметрів цифровий двійник формує рекомендації щодо вибору режимів роботи установки та дає можливість реалізувати прогнозне технічне обслуговування та запобігати виникненню аварійних ситуацій. Основними критеріями оптимізації є максимізація загального коефіцієнта корисної дії та мінімізація питомих витрат природного газу. На рис. 2 зображена послідовність прогнозування та оптимізації режимів роботи когенераційної установки.

Рис. 2. Послідовність прогнозування та оптимізації режимів роботи когенераційної установки

Оцінювання функціональних можливостей цифрового двійника

Оцінювання функціональних можливостей запропонованої архітектури виконано шляхом аналізу повноти реалізації основних функцій цифрового двійника відповідно до поставлених у роботі завдань. Оцінювання проводилося за етапами проходження інформаційного потоку, від збору технологічних даних до формування прогнозних моделей і підтримки прийняття рішень. Для кожного функціонального етапу визначалась наявність необхідних програмних компонентів, можливість їх інтеграції та відповідність задачам цифрового двійника.

Таблиця 2

Результати оцінювання функціональних можливостей цифрового двійника

Функція цифрового двійника	Засоби реалізації	Результат верифікації
Збір технологічних даних	ПЛК DIA.NE XT4, Schneider M262	Забезпечується отримання технологічних параметрів
Попередня обробка даних	AWS IoT SiteWise Edge	Забезпечується буферизація, агрегування та локальна обробка даних
Централізоване накопичення історичних даних	AWS IoT SiteWise	Забезпечується єдине сховище історичних даних цифрового двійника
Побудова цифрової моделі	AWS IoT TwinMaker	Забезпечується цифрове представлення підсистем когенераційної установки
Прогнозування технологічних параметрів	Amazon SageMaker	Забезпечується використання моделей прогнозування часових рядів та алгоритмів виявлення аномалій
Візуалізація та підтримка прийняття рішень	Amazon Managed Grafana	Забезпечується відображення поточних значень технологічних параметрів, прогнозів та повідомлень про відхилення

Результати проведеного оцінювання показали, що всі функціональні етапи роботи цифрового двійника забезпечені відповідними програмними компонентами та інтегровані в межах єдиного інформаційного середовища. Запропонована архітектура реалізує повний цикл функціонування цифрового двійника – від отримання первинних технологічних даних до їх накопичення, побудови цифрової моделі, прогнозування параметрів та формування рекомендацій щодо режимів експлуатації когенераційної установки.

На відміну від окремого використання систем моніторингу або аналітичних сервісів, запропоноване рішення забезпечує інтеграцію всіх функціональних компонентів у межах єдиної архітектури. Це дозволяє використовувати результати прогнозування безпосередньо під час аналізу поточного стану обладнання та створює основу для подальшого впровадження алгоритмів прогнозного технічного обслуговування і оптимізаційного керування.

Обмеження запропонованої архітектури цифрового двійника

Попри переваги запропонованої архітектури, її впровадження має наступні обмеження:

- Залежність від платформи. Запропоноване рішення базується на сервісах AWS, що може потребувати адаптації архітектури при використанні інших хмарних платформ.
- Якість навчальних даних. Точність прогнозних моделей безпосередньо залежить від повноти, достовірності та репрезентативності експлуатаційних даних. Недостатній обсяг історичних даних, пропуски вимірювань або суттєва зміна режимів роботи установки можуть знижувати точність прогнозування та вимагати періодичного перенавчання моделей машинного навчання.
- Кібербезпека. Передавання технологічної інформації між ПЛК та хмарною інфраструктурою потребує використання захищених каналів зв'язку, механізмів автентифікації користувачів і розмежування прав доступу до інформаційних ресурсів.

- Адаптація архітектури до іншого обладнання. Запропонована архітектура орієнтована на когенераційну установку Jenbacher JMS 624 GS-N.L. Її використання для інших типів когенераційних установок потребує коригування інформаційної моделі, переліку контрольованих параметрів та налаштування прогнозних моделей.

Висновки

У роботі проаналізовано сучасні підходи до застосування технології цифрових двійників в енергетичних системах та визначено основні напрями їх використання для моніторингу, прогнозування й оптимізації режимів роботи енергетичного обладнання. На основі проведеного аналізу розроблено архітектуру інтегрованого цифрового двійника когенераційної установки Jenbacher JMS 624 GS-N.L, яка поєднує засоби промислової автоматизації, хмарні сервіси та інструменти машинного навчання в межах єдиного цифрового середовища. Визначено перелік основних технологічних параметрів, що використовуються для формування цифрового двійника, а також обґрунтовано доцільність застосування моделей прогнозування часових рядів для оцінювання теплового навантаження, споживання природного газу та режимів роботи когенераційної установки. Показано можливість використання цифрового двійника для підтримки прийняття рішень, прогнозного технічного обслуговування та оптимізації експлуатаційних режимів. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшої практичної реалізації цифрового двійника та дослідження ефективності прогнозних алгоритмів на реальних експлуатаційних даних.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Heluany J. B., Gkioulos V. A review on digital twins for power generation and distribution. *International Journal of Information Security*. 2024. Vol. 23. DOI: 10.1007/s10207-023-00784-x.

2. Aghazadeh Ardebili A., Alahyari M., Shahsavari A. Digital Twins of Smart Energy Systems: a systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges. *Energy Informatics*. 2024. Vol. 7. DOI: 10.1186/s42162-024-00385-5.

3. Hashmi R., Liu H., Yavari A. Digital Twins for Enhancing Efficiency and Assuring Safety in Renewable Energy Systems: A Systematic Literature Review. *Energies.* 2024. Vol. 17, № 11. DOI: 10.3390/en17112456.

4. A Case Study of Digital-Twin-Modelling Analysis on Power-Plant- Performance Optimizations / Bin Xu et al. *Clean Energy*. 2019. Vol. 3, №3. P. 227–234. DOI: 10.1093/ce/zkz025.

5. Applications of the Digital Twin and the Related Technologies within the Power Generation Sector: A Systematic Literature Review / S. Shahmoradi et al. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 21. DOI: 10.3390/en18215627.

6. Digital Twin of Microgrid for Predictive Power Control to Buildings / H. Jiang et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, №2. DOI: 10.3390/su16020482.

7. Enhanced reinforcement learning-model predictive control for distributed energy systems: Overcoming local and global optimization limitations / H. Meng et al. *Building Simulation*. 2025. Vol. 18. P. 547–567. DOI: 10.1007/s12273-024-1227-9.

8. Digital Twin Technology for Renewable Energy, Smart Grids, Energy Storage and Vehicle-to-Grid Integration: Advancements, Applications, Key Players, Challenges and Future Perspectives in Modernising Sustainable Grids / A. Q. Al-Shetwi et al. *IET Smart Grid.* 2025. Vol. 8, Issue 1. DOI: 10.1049/stg2.70026.

9. Digital twins and their use in future power systems / P. Palensky et al. *Digital Twin*. 2024. Vol. 1, №3. DOI: 10.12688/digitaltwin.17435.2.

10. Zinsmeister D., Perić V. Implementation of a Digital Twin of the CoSES District Heating Prosumer Laboratory. *Energy Proceedings*. 2022. Vol. 26. DOI: 10.46855/energy-proceedings-10153.

Стаття надійшла до редакції 12.06.2026.
Стаття пройшла рецензування 13.07.2026.
Стаття опублікована 30.09.2026.

Поліщук Ігор Анатолійович – старший викладач кафедри автоматизації енергетичних процесів навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики, e-mail: pi020883@gmail.com, ORCID: 0009-0008-9526-2711.

Гуменюк Вадим Юрійович – магістрант кафедри автоматизації енергетичних процесів навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики, ORCID: 0009-0004-7129-0241.

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