

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

УДК 621.311:681.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.72.005>**ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ МІКРОМЕРЕЖ: КОНЦЕПЦІЇ, АРХІТЕКТУРИ ТА ВИКЛИКИ****П.В. Шиманюк***, канд. техн. наук, **В.В. Сичова****, канд. техн. наук, **І.В. Блінов*****, чл.-кор. НАН України

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: shymanp@ied.org.ua, shorl@ukr.net, blinovigor81@gmail.com

Цифрові двійники поступово стають важливою технологією цифрової трансформації енергетики. Вони забезпечують інтеграцію фізичних об'єктів мікромережі з їхніми віртуальними моделями, що дозволяє здійснювати моніторинг, аналіз і керування у реальному часі. У статті представлено огляд сучасних підходів до розроблення цифрових двійників для мікромереж, охоплено питання архітектури, моделювання, збору даних, оптимізації та віртуального тестування. Розглянуто основні технологічні рішення, зокрема з інтернетом речей, хмарними обчисленнями, машинним навчанням, методами прогнозного керування та інтеграцією edge computing. Проаналізовано три основні архітектурні підходи – тришарову модель, Smart Grid Architectural Model та кіберфізичні системи – і розглянуто приклади їхньої практичної реалізації у сучасних енергетичних платформах. Визначено виклики впровадження цифрових двійників у мікромережах, зокрема питання точності моделей, інтероперабельності, кібербезпеки та високих обчислювальних витрат. Показано, що перспективи розвитку полягають у створенні розподілених цифрових двійників, інтегрованих із системами штучного інтелекту та edge computing, що забезпечить перехід від статичних моделей до інтелектуальних самонавчальних енергетичних систем. Бібл. 26, таблиця.

Ключові слова: цифрові двійники, мікромережі, штучні нейронні мережі, відновлювані джерела енергії, вузлові навантаження.

Перехід до децентралізованої, гнучкої та стійкої енергетики є однією з найважливіших тенденцій сучасного розвитку енергосистем [1]. Зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), поява електромобілів, мікрогенерації та систем накопичення енергії призводять до суттєвого ускладнення управління енергетичною інфраструктурою.

У цьому контексті мікромережі розглядаються як перспективна форма локальних енергосистем, здатних до автономної роботи, оптимізації потоків енергії та підвищення енергетичної безпеки [2-5]. Водночас така складність потребує нового рівня цифровізації, який дозволяє здійснювати моніторинг, діагностику та керування мікромережею у режимі реального часу.

Одним із ключових інструментів цифрової трансформації енергетичного сектору є технологія цифрових двійників (Digital Twin, DT).

Концепція DT передбачає створення віртуальної копії фізичного об'єкта або системи, яка безперервно синхронізується з реальними даними, що надходять із сенсорів, IoT-пристроїв та систем управління. Така інтеграція утворює кіберфізичне середовище, у якому цифрова модель не лише відображає поточний стан системи, але й виконує аналітичні, прогнозні та оптимізаційні функції.

Формально цифровий двійник можна представити як множину:

$$DT = \{M_p, M_d, D, C\}, \quad (1)$$

де M_p – фізична модель системи, M_d – цифрова модель, D – потоки даних із сенсорів, C – комунікаційний канал, який забезпечує двосторонню синхронізацію між фізичним та цифровим рівнями.



Динамічну взаємодію між рівнями можна описати рівняннями:

$$\begin{aligned}x_d(t+1) &= f(x_d(t), u_p(t), D(t)) \\ u_p(t) &= g(x_d(t)),\end{aligned}\tag{2}$$

де $x_d(t)$ – вектор станів цифрової моделі, $u_p(t)$ – керуючий вплив, що формується на основі аналітики DT і передається фізичній системі.

Таким чином, DT функціонує як адаптивна система з замкненим контуром управління, що поєднує фізичні процеси, цифрове моделювання, аналітику даних та системи прийняття рішень.

У сфері енергетики цифрові двійники відкривають нові можливості для:

- віртуального тестування стратегій керування мікромережею без ризику для фізичної інфраструктури;
- прогнозування генерації, навантаження та стану обладнання на основі гібридних моделей;
- оптимізації енергетичного балансу, зниження втрат і підвищення ефективності розподілу ресурсів;
- підвищення надійності та кіберстійкості системи через інтеграцію моделей кіберзахисту.

Серед розробок, що існують у сфері математичного моделювання процесів та режимів електричних мереж, існують методи фізичного моделювання (використовуються спрощені або повні математичні моделі на основі рівнянь Максвелла для аналізу електромагнітних явищ); методи частотного моделювання (дослідження поведінки мережі в частотній області для оцінки гармонік, резонансних явищ тощо); методи часового моделювання (використовується метод кінцевих різниць у часовій області (FDTD) або SPICE для симуляції динамічних процесів; метод скінчених елементів (FEM) для аналізу локалізованих явищ, наприклад, струмів витoku або магнітних полів та група імовірнісних методів для моделювання невизначеностей, наприклад, змін у навантаженні чи відмов обладнання. Проблемою таких підходів є затримка у часі між внесенням даних у програму з отриманням результатів і фактичним прийняттям рішення у реальних умовах.

Згідно з останніми оглядами [6–10], інтерес до DT для мікромереж стрімко зростає: лише у 2021–2025 рр. кількість наукових публікацій у цій галузі зростає більш ніж утричі. Це свідчить про формування окремого наукового напрямку, що поєднує енергетику, кіберфізичні системи, машинне навчання та хмарні обчислення. Для України тема цифрових двійників є також актуальною [11–13]. Водночас залишаються відкритими питання, пов'язані з:

- точністю математичних моделей гібридних енергосистем,
- забезпеченням сумісності між платформами (interoperability),
- моделюванням у реальному часі,
- захистом даних та кібербезпекою.

Метою роботи є комплексний аналіз сучасних тенденцій розвитку цифрових двійників мікромереж, зокрема їхніх архітектур, технологічних основ, методів моделювання та практичних застосувань. У роботі також розглянуто основні виклики та напрями майбутніх досліджень, включно з інтеграцією DT з технологіями штучного інтелекту, edge computing та системами розподіленого управління.

Концепція та принципи роботи цифрових двійників у мікромережах

Концепція цифрового двійника (Digital Twin, DT) ґрунтується на створенні віртуального представлення фізичної системи, яке отримує потоки даних у реальному часі з датчиків, вимірjувальних приладів та систем моніторингу, що забезпечує синхронне відображення стану об'єкта [9, 10].

У найзагальнішому вигляді DT можна розглядати як динамічну кіберфізичну систему, де цифрова модель постійно оновлюється на основі реальних даних і здатна не лише імітувати поведінку фізичного прототипу, але й прогнозувати її майбутній стан.

Такі системи створюють основу для діагностики, прогнозування, оптимізації та авто-

мативованого управління, що особливо важливо для енергетичних об'єктів із високим ступенем варіативності, як-от мікромережі.

У контексті мікромереж цифровий двійник охоплює три взаємопов'язані рівні [14–15]:

1. Фізичний рівень (Physical Layer) – включає енергетичне обладнання: генератори, інвертори, системи накопичення енергії (ESS), лінії електропередачі, розподільчі пристрої та споживачів навантаження. Цей рівень є джерелом фактичних даних, що надходять від сенсорів і контролерів, і формує основу для створення цифрової копії.

2. Цифровий рівень (Digital Layer) – складається з математичних моделей фізичних компонентів, алгоритмів оптимізації та прогнозування, аналітичних модулів і платформ для обробки великих даних. На цьому рівні здійснюється симуляція процесів, аналітика станів системи, а також віртуальне тестування стратегій керування.

3. Комунікаційний рівень (Communication Layer) – реалізує зв'язок між фізичним і цифровим простором за допомогою IoT-пристроїв, телеметричних систем і протоколів передачі даних (наприклад, MQTT, OPC UA, IEC 61850). Цей рівень забезпечує двосторонню синхронізацію, де потоки даних у реальному часі використовуються для оновлення моделі, а керувальні сигнали від ДТ впливають на фізичну систему.

Функціональна сутність цифрового двійника полягає у зворотному зв'язку між цифровим і фізичним середовищами, що утворює замкнений цикл інформаційної взаємодії:

$$S_p \xrightarrow{D(t)} DT \xrightarrow{u(t)} S_p, \quad (3)$$

де S_p – фізична система (мікромережа), $D(t)$ – потік даних, $u(t)$ – керуючі дії, сформовані цифровою моделлю.

Цей механізм дає змогу не лише здійснювати моніторинг у реальному часі, але й активно впливати на роботу мікромережі, забезпечуючи адаптивність і стабільність її функціонування [16, 17].

Отже, цифровий двійник у мікромережах виступає центральною ланкою між фізичною інфраструктурою, аналітикою даних та системами керування, інтегруючи елементи моделювання, прогнозування, оптимізації та прийняття рішень у єдину взаємодіючу архітектуру.

Технології створення цифрових двійників для мікромереж

Розроблення цифрового двійника мікромережі є багатоступеневим процесом, який поєднує методи збору даних, математичного моделювання, обробки інформації та інтелектуального керування. Узагальнено цей процес можна подати як послідовність п'яти взаємопов'язаних етапів, кожен з яких забезпечує відповідну функцію у формуванні повноцінного кіберфізичного середовища.

1. Збір та інтеграція даних

Першим і базовим кроком є отримання достовірних даних із фізичної мікромережі.

Для цього використовуються смарт-лічильники, IoT-сенсорні вузли, SCADA-системи, розподілені вимірювальні комплекси та edge-пристрої [18, 19].

Зібрані дані охоплюють електричні параметри (напруга, струм, частота), стан обладнання, кліматичні характеристики, споживчі профілі та інші релевантні змінні.

Інтеграція даних реалізується через канали зв'язку з використанням стандартних протоколів MQTT, OPC UA, IEC 61850, що забезпечують інтероперабельність і стандартизацію інформаційних потоків.

2. Моделювання фізичних компонентів

На другому етапі формується модельна база цифрового двійника, яка відображає поведінку елементів мікромережі – генераторів, інверторів, систем накопичення енергії (ESS) та навантажень [9, 10, 14–20]. Моделі можуть створюватися з використанням трьох основних підходів:

- White-box modeling – побудова моделі на основі фізичних законів, наприклад, рівнянь енергетичного балансу:

- Grey-box modeling – поєднання аналітичних рівнянь із параметричною ідентифікацією за експериментальними даними.

- Black-box modeling – застосування алгоритмів машинного навчання (ML) або глибинного навчання (DL) для апроксимації нелінійної поведінки системи на основі великих масивів даних [15].

3. Інтеграція з платформами IoT та хмарними обчисленнями

Для ефективного функціонування цифрового двійника потрібна обчислювальна інфраструктура, здатна обробляти великі обсяги потоків даних у реальному часі.

Хмарні платформи забезпечують централізоване зберігання історичних даних, віддалений доступ і масштабованість, тоді як edge computing дозволяє виконувати попередню обробку сигналів ближче до джерела [21, 22].

Завдяки цьому досягається зниження затримок у передаванні даних і підвищення надійності системи.

Інтеграційна архітектура може бути описана як багаторівнева структура:

Device Layer → Edge Layer → Cloud Layer,

де обчислювальні завдання розподіляються відповідно до їхніх вимог до затримки, точності та обсягу даних.

4. Реалізація алгоритмів прогнозування та оптимізації

Однією з найважливіших складових DT є інтелектуальні аналітичні модулі, які виконують прогнозування параметрів і оптимізацію роботи мікромережі.

Для прогнозування споживання, генерації чи стану установки зберігання енергії (УЗЕ) використовуються алгоритми машинного навчання, глибинних нейронних мереж та гібридні методи [23, 24]:

$$y(t + \tau) = f_{ML}(y(t), D(t), W), \quad (4)$$

де $y(t+\tau)$ – прогнозована змінна, W – вагові параметри моделі.

Для оптимізації роботи мікромережі застосовують стохастичне програмування, MPC (Model Predictive Control), генетичні алгоритми та методи адаптивного управління.

5. Віртуальне тестування та симуляція

Заключним етапом є віртуальне тестування, яке дозволяє відтворювати та перевіряти сценарії роботи мікромережі без ризику для фізичної інфраструктури [8, 25].

Використання co-simulation та hardware-in-the-loop (HIL) платформ дає змогу перевіряти алгоритми керування, здійснювати випробування систем накопичення, інверторів і навантажень у безпечному середовищі. Метою цього етапу є валідація та верифікація поведінки цифрового двійника перед його розгортанням у реальній системі. Таким чином, віртуальна симуляція виступає ключовою ланкою між етапами розроблення моделі й її впровадженням у практичну експлуатацію.

Швидкість передачі даних у мікромережах залежить від застосованих технологій зв'язку: від кількох кілобіт на секунду до сотень мегабіт на секунду при використанні сучасних протоколів (Ethernet, Wi-Fi, LTE/5G). Також на швидкість передачі даних впливає відстань від вимірювальних пристроїв та мікромережі до обчислювальної машини. На якість передачі даних також впливає завадостійкість та стабільність каналу даних.

Для створення та ефективного функціонування цифрового двійника необхідна низка параметрів:

- електричні параметри: напруга, струм в лініях навантаження, частота, потужність та коефіцієнт потужності;
- параметри генерації: тип джерел генерації (СЕС, вітрові турбіни, генератори), потужність генераторів, ККД та технічні характеристики;
- параметри УЗЕ: Ємність батарей, потужність заряду, стан заряду, ефективність циклів;
- параметри навантаження: профілі споживання, класифікація навантаження, максимальне та середні значення споживання, еластичність попиту;
- метеорологічні дані: температура, вологість швидкість вітру, сонячна інсоляція;
- параметри топології мікромережі, які включають схеми з'єднання, опори та індуктивність ліній;

- параметри для комунікації: протокол обміну даних, параметри каналів, надійність та безпека передачі даних;
 - економічні параметри: тариф на електроенергію, вартість генерації та зберігання.
- Окрім того, для реалізації проєктів DT використовують ліцензійні програмні комплекси, такі як ANSYS Twin Builder, ANSYS Digital Twin, Azure Digital Twins та середовища доповненої реальності.

Архітектури моделей цифрових двійників для мікромереж

Ефективна реалізація цифрового двійника в енергетичних системах потребує чітко структурованої архітектури, яка визначає взаємозв'язки між фізичним обладнанням, цифровими моделями, комунікаційними каналами та аналітичними сервісами.

Архітектура моделі цифрового двійника забезпечує логічне узгодження потоків даних, обчислювальних процесів і управлінських функцій, що є важливим для реалізації DT у реальному часі [6].

У сучасних дослідженнях виділяють кілька основних архітектурних підходів до побудови цифрових двійників мікромереж.

1. Тришарова архітектура (Three-Layer Architecture)

Найпоширеніша модель цифрового двійника базується на тришаровій структурі, що складається з фізичного, віртуального та сервісного рівнів [6]. Цей підхід забезпечує ієрархічну організацію функцій та гнучкість інтеграції з різними типами пристроїв і платформ.

Фізичний шар – охоплює реальні об'єкти енергетичної інфраструктури: сенсори, актуатори, генератори, інвертори, системи зберігання енергії та навантаження. Основне завдання цього рівня – збір вимірювальних даних та їхня передача у цифрову модель.

Віртуальний шар (Virtual Layer) – представлений математичними моделями, цифровими копіями компонентів і середовищем симуляції. На цьому рівні виконується моделювання, прогнозування та верифікація поведінки системи.

Шар сервісів (Service Layer) – включає аналітичні модулі, системи візуалізації, бази даних і програмні інтерфейси управління. На цьому рівні реалізується інтелектуальне управління мікромережею, включно з прогнозуванням навантаження, виявленням відмов і оптимізацією режимів роботи.

Взаємодія між рівнями визначається двостороннім інформаційним потоком:

$$\text{Physical Layer} \leftrightarrow \text{Virtual Layer} \leftrightarrow \text{Service Layer},$$

що утворює замкнутий цикл управління, типовий для кіберфізичних систем.

2. Модель SGAM (Smart Grid Architectural Model)

Smart Grid Architectural Model (SGAM) – це європейський стандарт для опису та інтеграції розумних енергетичних систем, який також використовується як базова структура для побудови цифрових двійників [19]. SGAM охоплює п'ять функціональних доменів: генерування, передача, розподіл, споживання та ринок, а також п'ять рівнів інтероперабельності: бізнес, функціональний, інформаційний, комунікаційний і компонентний.

У контексті цифрових двійників SGAM дозволяє:

- забезпечити стандартизовану інтеграцію DT у реальні енергетичні системи;
- уніфікувати обмін даними між фізичними пристроями, цифровими моделями та системами управління;
- формалізувати взаємодію між різними учасниками енергетичного ринку.

Математично архітектуру SGAM можна подати як множину:

$$\text{SGAM} = \{D_i, L_j \mid i=1..5, j=1..5\},$$

де D_i – домен (generation, distribution тощо), L_j – рівень (communication, component, business тощо). Ця структура забезпечує багатовимірну інтеграцію цифрового двійника у складну енергетичну екосистему.

3. Кіберфізичні системи (Cyber-Physical Systems, CPS)

Підхід CPS розглядає цифровий двійник як інтегровану частину системи керування, у якій цифрова модель взаємодіє з фізичними об'єктами через двосторонні канали даних і ко-

манд [9]. На відміну від класичних архітектур, CPS характеризується сильною зчепленістю між рівнями та високою часовою роздільністю обміну інформацією.

Основна ідея полягає у створенні замкненого циклу керування (3), що забезпечує самоадаптацію системи до змін умов навантаження, генерації чи відмов компонентів. CPS-підхід особливо ефективний для реалізації DT у реальному часі, у тому числі для завдань прогнозного керування (MPC), координації розподілених генераторів та управління УЗЕ.

Порівняння архітектурних підходів

Архітектура	Переваги	Недоліки	Типові застосування
Three-Layer	Простота реалізації, модульність, масштабованість	Обмежена підтримка міждоменної взаємодії	Академічні прототипи, лабораторні моделі
SGAM	Високий рівень стандартизації, міжрівнева інтеграція	Складність реалізації, потреба у великих обчислювальних ресурсах	Smart campus, промислові мікромережі
CPS	Реальний час, зворотний зв'язок, висока автономність	Підвищені вимоги до кібербезпеки, синхронізації	Автономні мікромережі, IoT-енергосистеми

Таким чином, архітектура цифрового двійника визначає рівень інтеграції між фізичним та цифровим середовищем, а також спроможність системи до адаптивного управління у реальному часі. Вибір конкретного підходу залежить від масштабів мікромережі, доступної інфраструктури зв'язку та вимог до точності моделювання.

Приклади реалізації цифрових двійників у мікромережах

Практичне впровадження концепції цифрового двійника в енергетичних системах відбувається поступово – від лабораторних прототипів до реальних мікромереж із повною автоматизацією управління. Далі наведено кілька прикладів успішних реалізацій, що демонструють різні підходи до створення DT-платформ.

У роботі [7] було розроблено DT-платформу з повною автоматизацією мікромережі, яка інтегрує IoT-модулі збору даних, edge-аналітику та алгоритми адаптивного керування. Запропонована система забезпечує динамічну оптимізацію потоків енергії між генераторами, УЗЕ та навантаженнями, що дає змогу зменшити втрати та підвищити стійкість мікромережі до збурень. Характерною особливістю цього рішення є використання цифрового ядра (DT-core), яке синхронізується з фізичними даними в реальному часі.

Дослідження [20] продемонструвало використання цифрового двійника для оптимального планування енергоспоживання у віртуальному середовищі. Система дозволила моделювати та тестувати різні сценарії роботи мікромережі, що призвело до зниження операційних витрат на електроенергію на 15 %. Робота підкреслює потенціал віртуального простору DT як інструменту для відпрацювання стратегій оптимізації до їхнього впровадження в реальну інфраструктуру.

У публікації [20] було запропоновано цифровий двійник для координації мереж з'єднаних мікромереж. Модель поєднує оптимізаційні алгоритми (UC/OPF) з машинним навчанням для оцінки допоміжних сервісів і ризиків. Результати показали, що DT може підвищити ефективність управління резервами потужності та забезпечити гнучке реагування на аварійні події.

Впровадження, описане в [19], продемонструвало реалізацію цифрового двійника на основі архітектури SGAM для університетської мікромережі. Система об'єднує ВДЕ, УЗЕ та елементи управління через багаторівневу SGAM-модель, що забезпечує високий рівень інтегрованості та узгодження інформаційних потоків між компонентами.

Таким чином, сучасні реалізації демонструють еволюцію цифрових двійників від концептуальних моделей до повнофункціональних енергетичних платформ, які підтримують аналітику в реальному часі, віртуальне тестування, прогнозування та адаптивне керування.

Виклики та перспективи розвитку

Попри значні успіхи у впровадженні цифрових двійників у мікромережах, їхній розвиток супроводжується низкою технологічних, методологічних і організаційних викликів. Основні проблеми, відзначені в сучасній літературі, можна згрупувати у такі категорії:

1. Складність створення точних моделей гібридних енергосистем. Це спричинено нелінійністю, стохастичністю й різномірністю компонентів [8]. Це особливо актуально для гібридних мікромереж із поєднанням ВДЕ, УЗЕ і динамічних навантажень.

2. Кібербезпека та захист даних. Підключення DT до IoT-інфраструктури створює нові потенційні вектори атак [22]. Необхідно реалізовувати комплексні засоби шифрування, аутентифікації та виявлення аномалій для запобігання втручанням у системи управління.

3. Інтероперабельність та стандартизація. Відсутність єдиних стандартів опису даних і комунікацій ускладнює обмін інформацією між різними DT-платформами [21]. Проблему частково вирішує використання моделей типу SGAM, але потреба у розробленні глобальних протоколів залишається актуальною.

4. Високі обчислювальні витрати при моделюванні у реальному часі. Деталізовані симуляційні моделі потребують значних обчислювальних ресурсів, що обмежує їхнє використання в автономних або розподілених середовищах [26]. Актуальним стає питання оптимізації структури моделей та застосування паралельних або розподілених обчислень.

Перспективні напрями подальших досліджень зосереджуються на розвитку інтелектуальних, розподілених та енергоефективних DT-систем. Зокрема:

- інтеграція DT із технологіями штучного інтелекту (AI/ML) для побудови гібридних моделей, здатних до самонавчання та самокорекції [23, 24];

- розвиток концепції розподілених цифрових двійників (Distributed DT), де окремі вузли мікромереж мають власні локальні моделі, синхронізовані через edge- або fog-обчислення;

- використання edge computing для зменшення затримок обробки та підвищення стійкості систем до збоїв у мережі;

- стандартизація архітектурних рішень і формування спільних онтологій даних для уніфікації інтероперабельності.

У підсумку, цифрові двійники мікромереж еволюціонують від аналітичних моделей до інтелектуальних кіберфізичних систем, які здатні самоадаптуватися, самодіагностуватися та самооптимізуватися. Подальший розвиток цієї технології відкриває можливості для створення повністю автономних енергетичних мікросистем, здатних працювати з мінімальним втручанням оператора.

Висновки. Цифрові двійники є фундаментальним елементом майбутніх інтелектуальних енергетичних систем, оскільки поєднують моделювання, прогнозування та управління у єдиному кіберфізичному контурі. Проведений огляд підтвердив, що цифрові двійники для мікромереж сприяють підвищенню ефективності, надійності, безпеки та гнучкості роботи локальних енергетичних систем.

Технологічна основа DT ґрунтується на інтеграції фізичних моделей, сенсорних систем IoT, хмарних та edge-платформ, що дозволяє здійснювати аналіз і керування в реальному часі.

Математичне моделювання може реалізовуватися у форматах white-, grey- та black-box підходів, причому гібридні методи (physics-informed ML) демонструють найвищу ефективність.

Архітектурні рішення (тришарова, SGAM, CPS) забезпечують різний рівень інтеграції між фізичним і цифровим середовищем. SGAM дає змогу досягти міжрівневої інтероперабельності, тоді як CPS орієнтована на управління в реальному часі.

Сучасні реалізації цифрових двійників підтверджують можливість повної автоматизації мікромереж та оптимізації енергетичних процесів на основі симуляцій у віртуальному середовищі.

Перспективи розвитку пов'язані з поєднанням DT з методами штучного інтелекту,

створенням розподілених і самонавчальних моделей, а також із розвитком технологій edge/fog computing для зниження затримок обробки.

Отже, цифрові двійники відкривають нову парадигму управління мікромережами, перетворюючи їх із пасивних об'єктів моніторингу на активні інтелектуальні системи, здатні до самоадаптації, самодіагностики та автономного прийняття рішень.

Фінансується за держбюджетною темою «Розробка цифрового двійника мікромережі для оптимізації та керування децентралізованими мережами», (шифр «Двійник») №0125U002920 та за підтримки Національного фонду досліджень України в межах конкурсу «Передова наука в Україні» (Договір грантової підтримки № 241/0131)

1. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Цифрова трансформація: сучасні тенденції та завдання. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2023. Вип. 65. С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>
2. Блінов І.В., Палачов С.О., Парус Є.В. Функціонування сучасних систем енергоменеджменту мікромережі в умовах підключення до систем розподілу електроенергії згідно із вимогами міжнародних стандартів. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2025. Вип. 71. С. 15–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.71.015>
3. Блінов І.В., Парус Є.В., Шиманюк П.В., Ворущило А.О. Модель оптимізації функціонування мікромережі з СЕС та установкою зберігання енергії. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5. С. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.069>
4. Кириленко О.В., Блінов І.В., Зайцев Є.О., Палачов С.О., Васильченко В.І. Впровадження міжнародних та європейських стандартів для розвитку ОЕС України згідно з концепцією Smart Grid. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2022. Вип. 63. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>
5. Блінов І.В., Палачов С.О., Парус Є.В., Клименко О.Г. Сценарій використання мікромереж згідно з міжнародними стандартами. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2025. Вип. 70. С. 14–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.70.014>
6. Kumari, N., Sharma, A., Tran, B., Chilamkurti, N., & Alahakoon, D. A comprehensive review of digital twin technology for grid-connected microgrid systems: State of the art, potential and challenges faced. *Energies*. 2023. 16(14). Pp. 1–19.
7. Sahoo, B., Panda, S., Rout, P. K., Bajaj, M., & Blazek, V. Digital twin enabled smart microgrid system for complete automation: an overview. *Results in Engineering*. 2025. Pp. 1–16.
8. Bazmohammadi, N., Madary, A., Vasquez, J. C., Mohammadi, H. B., Khan, B., Wu, Y., & Guerrero, J. M. Microgrid digital twins: Concepts, applications, and future trends. *IEEE Access*. 2021. 10. Pp. 2284–2302.
9. Wu, Y., Guerrero, J. M., Wu, Y., Bazmohammadi, N., Vasquez, J. C., Cabrera, A. J., & Lu, N. Digital twins for microgrids: Opening a new dimension in the power system. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2024. 22(1). Pp. 35–42.
10. Jafari, M., Kavousi-Fard, A., Chen, T., & Karimi, M. A review on digital twin technology in smart grid, transportation system and smart city: Challenges and future. *IEEE Access*. 2023. 11. Pp. 17471–17484.
11. Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., & Slovikovskyi, O. Digital Twins of Different Types Electrical Machines. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2024. 63(2). Pp. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.2.01>
12. Plankovskyy, S., Tsegelnyk, Y., Voronov, R., Kalaitan, I., & Petrenko, V. Actual Tasks in Creating Digital Twins for Precise Electrochemical Machining. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2024. 63(1). Pp. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.1.02>
13. Pliuhin, V., Slovikovskyi, O., & Synelnykov, O. Formation the Robotic Mechanism Digital Twin Structure. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2024. 63(1). Pp. 27–34.
14. Kabir, M. R., Halder, D., & Ray, S. Digital twins for iot-driven energy systems: A survey. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 177123–177143. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3506660>
15. Chen, H., Zhang, Z., Karamanakos, P., & Rodriguez, J. Digital twin techniques for power electronics-based energy conversion systems: A survey of concepts, application scenarios, future challenges, and trends. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2022. 17(2). Pp. 20–36.
16. Park, H. A., Byeon, G., Son, W., Jo, H. C., Kim, J., & Kim, S. Digital twin for operation of microgrid: Optimal scheduling in virtual space of digital twin. *Energies*. 2020. 13(20). Pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13205504>
17. Парус Є.В., Блінов І.В. Оптимізація використання доступних енергоресурсів мікромережі за умов підтримки готовності до ізольованого режиму. *Технічна електродинаміка*. 2025. № 5. С. 56–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.05.056>
18. Eskandari, A., Emamian, M., Nedaei, A., & Aghaei, M. Digital twin technology in microgrid systems. *Digital Twin Technology for the Energy Sector*. Elsevier, 2024. Pp. 111-141. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14070-9.00005-6>

19. Kertha Utama, Putu and Nashirul Haq, Irsyad and Pradipta, Justin and Putra, Angga and Leksono, Edi, Microgrid Digital Twin: Implementation of Digital Twin Concept Based on Smart Grid Architectural Model (Sgam). *SSRN*. 2024. Pp. 1–23.
20. Hong, Y. Y., & Apolinario, G. F. D. Ancillary services and risk assessment of networked microgrids using digital twin. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2022. 38(5). Pp. 4542–4558.
21. Mchirgui, N., Quadar, N., Kraiem, H., & Lakhssassi, A. The applications and challenges of digital twin technology in smart grids: A comprehensive review. *Applied Sciences*. 2024. 14(23). Pp. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142310933>
22. Irmak, E., Kabalci, E., & Kabalci, Y. Digital transformation of microgrids: a review of design, operation, optimization, and cybersecurity. *Energies*. 2023. 16(12). Pp. 1–58. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124590>
23. Sahoo, B., & Samantaray, S. R. A review on digital twin integration in hybrid microgrids: challenges, opportunities, and innovations. Proc. 2025 3rd IEEE International Conference on *Industrial Electronics: Developments & Applications (ICIDEA)*. IEEE, February 2025. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIDEA64800.2025.10963330>
24. Song, Z., Hackl, C. M., Anand, A., Thommessen, A., Petzschmann, J., Kamel, O., ... & Hauptmann, S. Digital twins for the future power system: An overview and a future perspective. *Sustainability*. 2023. 15(6). Pp. 1–29. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15065259>
25. Al-Shetwi, A. Q., Atawi, I. E., El-Hameed, M. A., & Abuelrub, A. 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*. *IET Smart Grid*. 2025. 8(1). Pp. 1–37. DOI: <https://doi.org/10.1049/stg2.70026>
26. Wu, C., Cui, Z., Xia, Q., Yue, J., & Lyu, F. (2025). An overview of digital twin technology for power electronics: state-of-the-art and future trends. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2025. Vol. 40. Pp. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2025.3570638>

DIGITAL TWINS OF MICROGRIDS: CONCEPTS, ARCHITECTURES AND CHALLENGES

P. Shymaniuk, V. Sychova, I. Blinov

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: shymanp@ied.org.ua, shorl@ukr.net, blinovigor81@gmail.com

Digital twins are gradually becoming an important technology for the digital transformation of the energy sector. They provide integration of physical microgrid objects with their virtual models, which allows for real-time monitoring, analysis, and control. The article presents an overview of modern approaches to the development of digital twins for microgrids, covering issues of architecture, modeling, data acquisition, optimization, and virtual testing. The main technological solutions are considered, including the Internet of Things, cloud computing, machine learning, predictive control methods, and edge computing integration. Three main architectural approaches are analyzed – the three-layer model, the Smart Grid Architectural Model, and cyber-physical systems – and examples of their practical implementation in modern energy platforms are considered. The challenges of implementing digital twins in microgrids are identified, including issues of model accuracy, interoperability, cybersecurity, and high computational costs. It is shown that the development prospects lie in the creation of distributed digital twins integrated with artificial intelligence systems and edge computing, which will ensure the transition from static models to intelligent self-learning energy systems. Bibl. 26, table.

Keywords: digital twins, microgrid, artificial neural networks, renewable energy sources, nodal loads.

1. Kyrlyenko O., Denysiuk S., Blinov I. Digital transformation of the energy industry: current trends and task. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. Vol. 65. Pp. 5–14. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.65.005>
2. Blinov I., Palachov S., Parus Ye., Klymenko O., Functions of up-to-date microgrid energy management systems under grid-connected operation in compliance with international standards. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2025. Vol. 71. Pp. 15–27. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.71.015>
3. Blinov I.V., Parus Ye.V., Shymaniuk P.V., Vorushylo A.O. Optimization model of microgrid functioning with solar power plant and energy storage system. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. Vol. 5. Pp. 69–78. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.069>
4. Kyrlyenko I. O., Blinov I., Zaitsev Ie., Palachov S., Vasylychenko V. International and european standards implementation for uses of smart grid concept in ips of ukraine. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. Vol. 63. Pp. 5–12. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>
5. Blinov I., Palachov S., Parus E., Klymenko O. Use cases of microgrids according to international standards. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. Kyiv, 2025. Vol. 70. Pp. 14–25. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.70.014>
6. Kumari, N., Sharma, A., Tran, B., Chilamkurti, N., & Alahakoon, D. A comprehensive review of digital twin technology for grid-connected microgrid systems: State of the art, potential and challenges faced. *Energies*. 2023. 16(14). Pp. 1–19.

7. Sahoo, B., Panda, S., Rout, P. K., Bajaj, M., & Blazek, V. Digital twin enabled smart microgrid system for complete automation: an overview. *Results in Engineering*. 2025. Pp. 1–16.
8. Bazmohammadi, N., Madary, A., Vasquez, J. C., Mohammadi, H. B., Khan, B., Wu, Y., & Guerrero, J. M. Microgrid digital twins: Concepts, applications, and future trends. *IEEE Access*. 2021. 10. Pp. 2284–2302.
9. Wu, Y., Guerrero, J. M., Wu, Y., Bazmohammadi, N., Vasquez, J. C., Cabrera, A. J., & Lu, N. Digital twins for microgrids: Opening a new dimension in the power system. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2024. 22(1). Pp. 35–42.
10. Jafari, M., Kavousi-Fard, A., Chen, T., & Karimi, M. A review on digital twin technology in smart grid, transportation system and smart city: Challenges and future. *IEEE Access*. 2023. 11. Pp. 17471–17484.
11. Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., & Slovikovskyi, O. Digital Twins of Different Types Electrical Machines. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2024. 63(2). Pp. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.2.01>
12. Plankovskyy, S., Tsegelnyk, Y., Voronov, R., Kalaitan, I., & Petrenko, V. Actual Tasks in Creating Digital Twins for Precise Electrochemical Machining. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2024. 63(1). Pp. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.1.02>
13. Pliuhin, V., Slovikovskyi, O., & Synelnykov, O. Formation the Robotic Mechanism Digital Twin Structure. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2024. 63(1). Pp. 27–34.
14. Kabir, M. R., Halder, D., & Ray, S. Digital twins for iot-driven energy systems: A survey. *IEEE Access*. 2024. Vol.12. Pp. 177123–177143. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3506660>
15. Chen, H., Zhang, Z., Karamanakos, P., & Rodriguez, J. Digital twin techniques for power electronics-based energy conversion systems: A survey of concepts, application scenarios, future challenges, and trends. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2022. 17(2). Pp. 20–36.
16. Park, H. A., Byeon, G., Son, W., Jo, H. C., Kim, J., & Kim, S. Digital twin for operation of microgrid: Optimal scheduling in virtual space of digital twin. *Energies*. 2020. 13(20). Pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13205504>
17. Parus Ye.V., Blinov I.V. Optimization of the use of available energy resources of the microgrid under the condition of supporting readiness for isolated mode. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2025. № 5. Pp. 56–69. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.05.056>
18. Eskandari, A., Emamian, M., Nedaei, A., & Aghaei, M. Digital twin technology in microgrid systems. *Digital Twin Technology for the Energy Sector*. Elsevier, 2024. Pp. 111–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14070-9.00005-6>
19. Kertha Utama, Putu and Nashirul Haq, Irsyad and Pradipta, Justin and Putra, Angga and Leksono, Edi, Microgrid Digital Twin: Implementation of Digital Twin Concept Based on Smart Grid Architectural Model (Sgam). *SSRN*. 2024. Pp. 1–23.
20. Hong, Y. Y., & Apolinario, G. F. D. Ancillary services and risk assessment of networked microgrids using digital twin. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2022. 38(5). Pp. 4542–4558.
21. Mchirgui, N., Quadar, N., Kraiem, H., & Lakhssassi, A. The applications and challenges of digital twin technology in smart grids: A comprehensive review. *Applied Sciences*. 2024. 14(23). Pp. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142310933>
22. Irmak, E., Kabalci, E., & Kabalci, Y. Digital transformation of microgrids: a review of design, operation, optimization, and cybersecurity. *Energies*. 2023. 16(12). Pp. 1–58. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124590>
23. Sahoo, B., & Samantaray, S. R. A review on digital twin integration in hybrid microgrids: challenges, opportunities, and innovations. Proc. 2025 3rd IEEE International Conference on *Industrial Electronics: Developments & Applications (ICIDeA)*. IEEE, February 2025. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIDeA64800.2025.10963330>
24. Song, Z., Hackl, C. M., Anand, A., Thommessen, A., Petzschmann, J., Kamel, O., ... & Hauptmann, S. Digital twins for the future power system: An overview and a future perspective. *Sustainability*. 2023. 15(6). Pp. 1–29. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su15065259>
25. Al-Shetwi, A. Q., Atawi, I. E., El-Hameed, M. A., & Abuelrub, A. 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. *IET Smart Grid*. 2025. 8(1). Pp. 1–37. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/stg2.70026>
26. Wu, C., Cui, Z., Xia, Q., Yue, J., & Lyu, F. (2025). An overview of digital twin technology for power electronics: state-of-the-art and future trends. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2025. Vol. 40. Pp. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2025.3570638>

Надійшла: 25.11.2025

Прийнята: 04.12.2025

Submitted: 25.11.2025

Accepted: 04.12.2025