

ОМЕЛЯНЕНКО ГАЛИНА ВІКТОРІВНА – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, гарант освітньої програми G3 «Електроенергетика», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-5476>; e-mail: omeljanenkgalina@gmail.com.

ГУРІНЧУК ВАЛЕРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ ✉ – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6958-1048>; e-mail: valerio.gurinchuk@gmail.com.

ФОРМУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ПОЕТАПНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

Стаття присвячена систематизації концептуальних засад та аналізу практичних аспектів застосування технології цифрових двійників в енергетичній галузі. Актуальність дослідження зумовлена прискореною цифровою трансформацією енергосистем, зростанням частки відновлюваних джерел енергії у структурі генерації та недостатністю традиційних інструментів диспетчерського управління для вирішення завдань предиктивного моніторингу і оптимізації режимів роботи в умовах підвищеної стохастичності навантажень. На основі критичного аналізу наявних підходів проведено дослідження та встановлено, що для електроенергетики цифровий двійник доцільно розглядати як тривірневу кіберфізичну систему, яка охоплює фізичний рівень, рівень передачі та обробки даних і рівень цифрової моделі та забезпечує безперервну синхронізацію з фізичним об'єктом у режимі, наближеному до реального часу. Показано, що ефективна реалізація цифрових двійників в енергетиці ґрунтується на конвергенції пристроїв вимірювання комплексної амплітуди, стандарту IEC 61850, хмарних обчислень та засобів обробки великих даних, а інтеграція алгоритмів машинного навчання розширює функціональність цифрових двійників до прогнозування стану, оцінювання залишкового ресурсу та оптимізації диспетчерських рішень. Проведено порівняльний аналіз цифрових двійників із системами диспетчерського управління та збору даних у реальному часі, який засвідчив, що традиційні системи забезпечують переважно реактивний контроль, тоді як цифрові двійники формують предиктивну спостережність, підтримують сценарне моделювання та замкнений цикл оптимізуючого управління. Узагальнення практичних кейсів підтвердило економічну й операційну доцільність застосування цифрових двійників у сегментах генерації, передачі та накопичення електроенергії, а SWOT-аналіз умов впровадження в енергетичній системі України виявив як наявні інституційні передумови, так і суттєві технологічні, фінансові та кібернетичні обмеження. На цій основі обґрунтовано дорожню карту поетапного впровадження цифрових двійників в енергосистему – від цифрової репрезентації фізичного об'єкта або системи, яка оновлюється в режимі реального часу на рівні підстанції до повноцінного цифрового двійника на загальносистемному рівні.

Ключові слова: електроенергетична система; відновлювальні джерела енергії; цифровий двійник; машинне навчання; нейронні мережі; цифровізація; гібридні фізично-інформовані моделі.

Постановка проблеми. Об'єднана енергетична система (ОЕС) України є однією з найбільших синхронних енергосистем Європи і охоплює розгалужену мережу генеруючих об'єктів, магістральних та розподільних ліній електропередачі, трансформаторних підстанцій і диспетчерських центрів управління. Географічна протяжність інфраструктури в межах понад 600 тисяч квадратних кілометрів обумовлює принципово нелінійну топологію мережових з'єднань та ускладнює забезпечення однорідного рівня телемеханічного покриття і передачі даних у реальному часі. Зазначена просторова розпороченість об'єктів є одним із ключових чинників, що визначає архітектурні вимоги до систем моніторингу та управління, в тому числі до перспективних рішень на основі цифрових двійників. Цифровий двійник (ЦД) розглядається як одна з ключових технологій Індустрії 4.0 і є перспективним інструментом підвищення операційної ефективності в електроенергетиці [1, 2]. На відміну від статичних розрахункових моделей, ЦД функціонує в режимі реального часу, інтегруючи потоки сенсорних даних, фізичні рівняння та алгоритми машинного навчання в єдину обчислювальну платформу підтримки прийняття рішень.

Незважаючи на значний масив публікацій, присвячених ЦД в електроенергетиці, питання системного застосування цієї технології в ОЕС України, залишається недостатньо дослідженим, що й

обумовлює актуальність дослідження. Відсутні верифіковані методичні підходи до поетапного впровадження ЦД з урахуванням технологічної неоднорідності існуючої інфраструктури, нерівномірності цифровізації та специфічних вимог до кіберзахисту в умовах функціонування критичної інфраструктури.

Аналіз публікацій. Основу термінологічного апарату ЦД у промислових застосуваннях закладено у роботі зарубіжних вчених [1], де концепція ЦД уперше формалізована в контексті управління життєвим циклом виробів. Первинний розвиток технологія отримала в аерокосмічній галузі: Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору розробила високоточні віртуальні репліки бортових систем для дистанційного моніторингу в реальному часі під час космічних місій [2]. Ці ранні реалізації заклали принцип безперервної синхронізації фізичного та цифрового об'єктів, що залишається базовим для всіх подальших архітектурних рішень.

Більшість публікацій присвячено застосуванню ЦД у відновлюваній енергетиці. В роботі [3] проаналізовано понад 150 публікацій за період 2014–2024 рр. Автори запропонували таксономію, що класифікує застосування ЦД за типом енергетичного ресурсу (сонячна, вітрова, гідроенергетика, гібридні системи) та фазою життєвого циклу активу — від проектування до виведення з експлуатації. Зазначений огляд демонструє, що найвища концентрація

© Г. В. Омеляненко, В. О. Гурінчук, 2026



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

досліджень зосереджена на об'єктах сонячної фотоенергетики (близько 45 % задокументованих впроваджень) та вітрових установках (близько 30 %), тоді як гідроенергетика та гібридні мікромережі залишаються відносно менш дослідженими.

Значний внесок у верифікацію практичної ефективності ЦД здійснено через промислові впровадження провідних компаній галузі. Платформа GE Digital Wind Farm, побудована на основі Predix, забезпечує симуляцію кожної турбіни в реальному часі з використанням телеметрії тензометрів лопатей та вібраційних датчиків; задокументоване скорочення незапланованих простоїв становить до 25 %, а прогнозований ресурс турбін зростає на 5 років [3]. Siemens Gamesa інтегрувала ЦД у платформи офшорних турбін для дистанційної інспекції та виявлення аномалій у редукторах. У секторі сонячної фотоенергетики компанії Huawei та Sungrow впровадили ЦД у системи управління інверторами, досягнувши скорочення середнього часу відновлення (Mean Time to Repair, MTTR) на 15–20 % та підвищення виробітку на 5–8 % [4]. У гідроенергетиці показовим є приклад Électricité de France (EDF) [4], яка розробила ЦД греблі Вільрест у Франції: модель інтегрує дані витратомірів, датчиків рівня води та систем Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), що дозволило підвищити ефективність диспетчеризації на 12 % протягом шестимісячного операційного циклу.

Мета статті. полягає в дослідженні теоретичних засад і практичних аспектів застосування технології цифрових двійників в електроенергетиці для формування науково обґрунтованої концепції поетапного впровадження ЦД в ОЕС України.

Для досягнення зазначеної мети вирішуються такі завдання:

- аналіз архітектури цифрових двійників в електроенергетиці;
- аналіз архітектурних рішень і технологій, що сприяють розвитку (Enabler Technologies);
- дослідження методів інтеграції алгоритмів машинного навчання;
- порівняльний аналіз функціональних можливостей ЦД та SCADA/EMS (Energy Management System);
- огляд практичних кейсів впровадження; обґрунтування концепції поетапного впровадження ЦД в ОЕС України.

Архітектура цифрових двійників в електроенергетиці. Функціональна архітектура ЦД в електроенергетиці є трирівневою і включає фізичний рівень, рівень передачі та обробки даних і рівень цифрової моделі. Кожен рівень виконує чітко визначені функції, а їх взаємодія утворює замкнений цикл кіберфізичної системи, що забезпечує безперервне відтворення стану фізичного об'єкта в його цифровому відображенні [4–6].

Фізичний рівень. Фізичний рівень охоплює безпосередньо об'єкт моніторингу – силовий трансформатор, підстанцію, лінію електропередачі, генеруючу установку або їх сукупність — та сукупність вимірювальних пристроїв, що забезпечують первинну інформацію для ЦД. До складу вимірювальної інфраструктури входять традиційні

телемеханічні вузли SCADA (вимірювання напруг, струмів, потужностей, стану комутаційного обладнання), вимірювачі синхронізованих векторів для вимірювань фазових кутів у режимі реального часу, а також спеціалізовані сенсори технічного стану – давачі температури, вібрації, часткових розрядів, вмісту розчинених газів у трансформаторному маслі тощо.

Якість первинних вимірювань є визначальним чинником для точності ЦД: похибка синхронізації між фізичним станом об'єкта та його цифровим відображенням $\varepsilon(t)$ безпосередньо залежить від метрологічних характеристик вимірювального обладнання, частоти дискретизації та затримок у каналах передачі даних. Для ЦД реального часу стандартом де-факто є використання пристроїв вимірювання комплексної амплітуди (Phasor Measurement Unit, PMU) з частотою вибірки не менше 50 відліків на секунду та синхронізацією за GPS-сигналом [7].

Рівень передачі та обробки даних. Рівень передачі та обробки даних забезпечує збір, агрегацію, часову синхронізацію та первинну фільтрацію потоків вимірювальних даних, що надходять від пристроїв фізичного рівня. Комунікаційна інфраструктура цього рівня може базуватися на стандартизованих промислових протоколах – IEC 61850, IEC 60870-5-104, DNP3 – або на власних протоколах виробників SCADA-систем [7, 8]. Вибір комунікаційної платформи суттєво впливає на латентність системи і є одним із ключових архітектурних рішень при проектуванні ЦД.

На цьому рівні також реалізуються функції граничних обчислень: первинна обробка та компресія даних безпосередньо на місці їх збору, виконання алгоритмів виявлення аномалій з мінімальною затримкою, а також буферизація даних в умовах нестабільності каналів зв'язку. Застосування edge-вузлів дозволяє знизити трафік до центрального вузла обробки та забезпечити функціонування локальних захисних функцій незалежно від якості каналів зв'язку з верхнім рівнем [6].

Рівень цифрової моделі. Рівень цифрової моделі є обчислювальним ядром ЦД і включає сукупність моделей, алгоритмів та інформаційних сервісів, що забезпечують відтворення, аналіз та прогнозування стану фізичного об'єкта. Залежно від природи об'єкта та функціональних вимог, моделі ЦД можуть будуватися на детерміністичних фізичних рівняннях, на статистичних методах і алгоритмах машинного навчання, або являти собою гібридні конфігурації, в яких фізично обґрунтовані обмеження інтегруються в структуру нейронної мережі [5].

Для електроенергетичних об'єктів фізично обґрунтовані компоненти моделі базуються на рівняннях балансу потужностей і струмів, рівняннях теплового балансу для оцінювання температурних полів, моделях деградації ізоляції та контактних з'єднань. Алгоритми машинного навчання доповнюють ці компоненти функцією розпізнавання патернів та виявлення відхилень від нормального режиму роботи в умовах нестаціонарних режимів і нелінійних взаємодій між підсистемами [4].

Методи інтеграції алгоритмів машинного навчання у структуру цифрових двійників. Інтеграція алгоритмів машинного навчання є

ключовим чинником, що переводить ЦД від пасивного інструмента моніторингу до активної системи підтримки прийняття рішень. Для електроенергетики найбільш затребуваними є алгоритми обробки часових рядів і оптимізації управляючих впливів, що відповідає функціям прогнозування навантажень, оцінювання стану обладнання та диспетчерської оптимізації [5].

Рекурентні нейронні мережі для прогнозування часових рядів. Мережі з довготривалою короткостроковою пам'яттю (Long Short-Term Memory, LSTM) є спеціалізованим класом рекурентних нейронних мереж, розроблених для обробки послідовних даних з тривалими залежностями. В архітектурі ЦД LSTM-мережі застосовуються для вирішення задач прогнозування навантажень і генерації на горизонтах від кількох хвилин до кількох діб, прогнозування температурних профілів обладнання, а також виявлення аномалій у часових рядах параметрів технічного стану.

Математичний апарат LSTM-комірки включає три вентиля – вхідний, вихідний і вентиль забування – що спільно управляють інформаційним потоком у прихованому стані мережі. Ця архітектура дозволяє ефективно моделювати сезонні патерни, добові ритми навантаження та тривалі кореляції між параметрами енергосистеми, що є характерними для часових рядів потужності. У задачах прогнозування залишкового ресурсу обладнання LSTM успішно апроксимує нелінійні тренди деградації, недоступні для класичних авторегресійних моделей.

Навчання з підкріпленням для оптимізації диспетчерських рішень. Алгоритми навчання з підкріпленням формують принципово відмінну від LSTM парадигму: замість навчання на фіксованому наборі даних агент підкріплювального навчання (reinforcement learning, RL) навчається через взаємодію з моделлю середовища, отримуючи сигнали винагороди за прийняті рішення. В архітектурі ЦД модель середовища формується цифровою тінню або цифровим двійником системи, а агент RL навчається оптимальній стратегії управління шляхом симульованої взаємодії з нею [5].

Для задач управління енергосистемами RL демонструє конкурентоспроможні результати в задачах оптимізації графіків навантаження генеруючих установок з мінімізацією операційних витрат, управління зарядом/розрядом накопичувачів енергії в режимі реального часу, координації розподіленої генерації в мікромережах, а також реконфігурації розподільних мереж у пошуку оптимальної топології. Принциповою перевагою RL перед класичними методами оптимізації є можливість навчання в умовах неповної інформації та стохастичного середовища, що відповідає реальним умовам функціонування ОЕС з високою часткою відновлюваних джерел.

Гібридні фізично-інформовані моделі. Перспективним напрямом, що поєднує переваги фізично обґрунтованих і дата-центрованих підходів, є фізико-орієнтовані нейронні мережі. В архітектурі нейронних мереж фізичні рівняння, що описують поведінку об'єкта, вводяться безпосередньо у функцію втрат нейронної мережі у вигляді м'яких обмежень. Це дозволяє досягти більш точних та фізично узгоджених прогнозів при значно менших обсягах навчальних

даних порівняно з чисто дата-центрованими моделями – що є критично важливим для об'єктів з обмеженою вимірною інфраструктурою [4].

Порівняльний аналіз цифрових двійників та традиційних систем SCADA/EMS. Коректне позиціонування ЦД відносно існуючих систем управління SCADA/EMS є методологічною передумовою для обґрунтування доцільності впровадження нової технології. Ці системи не є взаємовиключними: ЦД органічно інтегрується з існуючою SCADA-інфраструктурою і доповнює функціонал EMS, а не замінює їх [3].

Функціональне порівняння. SCADA-системи виконують функції збору телемеханічних даних у режимі реального часу, дистанційного управління комутаційним обладнанням, архівування та відображення вимірювань. EMS-функціонал надбудовується над SCADA і включає оцінювання стану мережі, розрахунок потокорозподілу, виявлення порушень та оптимальний розподіл активної потужності. Обидві системи орієнтовані на роботу з поточним станом системи і не мають вбудованих механізмів прогнозування майбутніх станів або оцінювання технічного стану обладнання [3].

ЦД у порівнянні з SCADA/EMS забезпечує принципово нові можливості: по-перше, предиктивну спостережність системи – здатність прогнозувати майбутні стани та аномалії до їх настання; по-друге, оцінювання технічного стану та залишкового ресурсу конкретних одиниць обладнання на основі інтегрованих фізичних моделей деградації; по-третє, підтримку сценарного аналізу – можливість симулювання різних режимів та аварійних ситуацій у цифровому середовищі без впливу на фізичну систему; по-четверте, замкнений цикл оптимізуючого управління на основі алгоритмів RL у режимі реального часу.

Технологічна порівняльна характеристика. З точки зору технологічної архітектури, SCADA є централізованою ієрархічною системою з обмеженими можливостями обробки даних безпосередньо на польовому рівні. Цифровий двійник передбачає розподілену архітектуру з можливістю розгортання обчислювальних функцій на всіх рівнях – від edge-вузлів безпосередньо на об'єктах до хмарних платформ для аналітики великих даних. Інтервал оновлення стану в традиційних SCADA становить від 2 до 10 секунд, тоді як PMU-засновані ЦД можуть оновлювати стан системи з частотою до 60 разів на секунду – що є принципово важливим для задач контролю стійкості та виявлення електромеханічних осциляцій [3].

Затримка реагування SCADA/EMS на відхилення від нормального режиму визначається компетентністю та швидкістю реакції оперативного персоналу і зазвичай становить від кількох секунд до кількох хвилин. ЦД з вбудованими алгоритмами виявлення аномалій здатний ідентифікувати відхилення за мілісекунди від їх настання та ініціювати попереджувальні сигнали або автоматичні керуючі впливи без участі оператора.

Практичні кейси застосування цифрових двійників в енергетичних системах. Аналіз задокументованих промислових і дослідницьких впроваджень ЦД в електроенергетиці дозволяє

виокремити репрезентативні кейси, що охоплюють різні типи об'єктів та різні функціональні аспекти технології. Наведені нижче приклади відібрані за критерієм наявності кількісно верифікованих результатів впровадження.

ЦД вітрових турбін – GE Digital Wind Farm.

Компанія General Electric впровадила платформу Digital Wind Farm, в якій для кожної вітрової турбіни розгортається індивідуальний ЦД, що отримує телемеханічні дані від давачів вібрації, температури підшипників та редуктора, кутів нахилу і ризику лопатей, а також характеристик генератора. ЦД реалізує прогнозування залишкового ресурсу ключових компонентів на основі моделі накопичення пошкоджень Майнера, оптимізує кути нахилу і ризику лопатей у відповідь на зміну вітрових умов, а також генерує превентивні замовлення на технічне обслуговування. За результатами промислового застосування зафіксовано скорочення незапланованих простоїв турбін на 25 % та подовження розрахункового ресурсу ключових вузлів до 5 років [4].

ЦД сонячних інверторів – Huawei FusionSolar.

Платформа Huawei FusionSolar реалізує ЦД для сонячних інверторів у складі промислових фотоелектричних станцій. ЦД інтегрує вимірювання рівня сонячної радіації, температури модулів, вихідних напруг та струмів, а також розраховує коефіцієнт забруднення поверхні модулів на основі відхилення виміряної потужності від прогнозованої. Алгоритм MPPT-оптимізації динамічно адаптується до змін вхідних умов, включаючи ефект часткового затінення. За даними виробника, впровадження ЦД-функціоналу забезпечує скорочення середнього часу відновлення після відмов на 15–20 % та підвищення питомого енергетичного виходу на 5–8 % [4].

ЦД гідротехнічних споруд – EDF, дамба Villerest. Компанія EDF розробила ЦД для гідровузла Villerest на річці Луара, який інтегрує модель гідрологічних процесів, структурного стану греблі та режиму роботи турбоагрегатів. ЦД синхронізує дані від давачів рівня та витрати води, датчиків деформацій греблі, SCADA-системи гідровузла та зовнішніх метеорологічних сервісів. На основі прогнозних гідрологічних даних ЦД оптимізує добові та тижневі графіки водопропуску, що за результатами шестимісячного операційного циклу забезпечило підвищення ефективності диспетчеризації на 12 %.

ЦД гібридної мікромережі. Міністерство енергетики США реалізувало пілотний проект гібридної мікромережі з ЦД, що включає сонячну фотоелектричну установку, вітрогенератор та літій-іонну систему накопичення енергії. Централізований ЦД виконує функції прогнозування навантаження та генерації на горизонті 24 години, оптимізації графіка заряду/розряду накопичувача з мінімізацією зносу, а також динамічної регуляції напруги в точці загального підключення. Верифіковані результати включають: скорочення операційних витрат мікромережі понад 10 %, зменшення залежності від резервного дизельного генератора на 22 % та подовження строку служби акумуляторів на 15 % [4, 7].

Узагальнення наведених кейсів свідчить про те, що найбільш значущі операційні ефекти від впровадження ЦД досягаються не за рахунок будь-якої

однієї функції, а внаслідок синергії предиктивного моніторингу, оптимізуючого управління та сценарного аналізу в єдиній інтегрованій платформі. Якість первинної вимірювальної інфраструктури та стабільність каналів передачі даних є неодмінними передумовами досягнення описаних результатів.

Передумови та умови впровадження цифрових двійників в ОЕС України. Специфіка енергетичної інфраструктури України. Парк основного технологічного обладнання ОЕС формувався переважно в радянський період і характеризується значною технологічною неоднорідністю. Значна частина силових трансформаторів, комутаційного обладнання та засобів релейного захисту введена в експлуатацію у 1970–1990-х роках і наближається або перевищує нормативний термін служби. Паралельно протягом останніх двох десятиліть здійснюється поетапна модернізація підстанцій із заміною аналогового обладнання на мікропроцесорні пристрої захисту та автоматики, впровадженням цифрових вимірювальних перетворювачів і сучасних систем технологічного зв'язку. Така гетерогенність становить одну з основних технічних перешкод для створення інтегрованих інформаційних моделей, необхідних для функціонування ЦД.

Впровадження стандарту IEC 61850 [7] в Україні перебуває на стадії поступового та нерівномірного розгортання. Нові підстанції 110–750 кВ оснащуються пристроями з підтримкою повідомлень та протоколів відповідно до IEC 61850-8-1. Водночас на більшості об'єктів, що не пройшли реконструкцію, застосовуються застарілі протоколи (Modbus, DNP3, IEC 60870-5-104). Наявність РМУ-інфраструктури, сформованої в рамках інтеграції з Європейською системою ENTSO-E, може слугувати первинним інформаційним базисом для верхнього рівня ЦД [8].

Для обґрунтування впровадження цифрових двійників в ОЕС України доцільно виконати SWOT-аналіз (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats – SWOT).

SWOT-аналіз умов впровадження цифрових двійників в ОЕС України. Систематизація факторів, що визначають перспективи інтеграції ЦД в операційне середовище ОЕС України, доцільна у форматі SWOT-аналізу. Наведений нижче аналіз охоплює чотири квадранти: сильні сторони, слабкі сторони, можливості та загрози.

Сильною стороною (Strengths) є наявна SCADA-інфраструктура ОЕС, яка формує функціональний базис для первинного збору та передачі технологічних даних. Досвід синхронізації з ENTSO-E у березні 2022 року засвідчив інституційну та технічну спроможність системи до комплексної інтеграції з вимогами зовнішніх регуляторних і технічних стандартів.

Слабкою стороною (Weaknesses) та критичною обмеженістю залишається значний знос основного обладнання: понад 60 % трансформаторів магістральної мережі відпрацювали нормативний термін служби. Відсутність уніфікованих галузевих стандартів ЦД унеможливорює системне розгортання рішень на різних об'єктах. Обмеженість фінансових ресурсів додатково сповільнює темпи модернізації.

Можливості (Opportunities) відкриває Євроінтеграція, яка веде до адаптації до стандартів

Євросоюзу. Програми фінансової підтримки Європейського інвестиційного банку, Європейського банку реконструкції та розвитку, а також EU4Energy містять компоненти цифровізації інфраструктури. Трансфер технологій від європейських партнерів прискорює освоєння перевірених архітектурних рішень.

Головними *загрозами (Threats)* наразі виступають кібератаки, які є найбільш критичним ризиком. Фізична вразливість інфраструктури в умовах збройного конфлікту обмежує надійність вимірювальної бази. Правова невизначеність у сфері операційних даних ускладнює залучення іноземних технологічних партнерів.

Концепт поетапного впровадження цифрових двійників в ОЕС України. Враховуючи технологічну неоднорідність ОЕС України та структурні обмеження, обґрунтована стратегія полягає у трифазній дорожній карті, де кожна наступна фаза спирається на верифіковані результати попередньої. Такий підхід застосовувався оператором National Grid ESO (Велика Британія) — найближчою за масштабом і контекстом аналогією для ОЕС України.

Фаза 1. Пілотне впровадження на рівні підстанції. Розгортання ЦД на рівні однієї або кількох підстанцій з ІЕС 61850 та РМУ [9, 10]. На цьому етапі ЦД реалізується як “цифрова тінь”: модель отримує синхронізовані потоки даних, але зворотний керуючий зв'язок не здійснюється. Ключове технічне завдання – мінімізація похибки синхронізації $\epsilon(t)$.

Фаза 2. Масштабування на регіональний рівень з edge-вузлами. Охоплення сукупності підстанцій операційної зони з розгортанням локальних обчислювальних вузлів. ЦД еволюціонує від моніторингу до прогнозування: генеруються оцінки залишкового ресурсу ключових компонентів.

Фаза 3. Інтеграція в загальносистемну платформу управління ОЕС. Реалізація повноцінного із замкненим циклом управління під управлінням Укренерго. LSTM-моделі та алгоритми RL забезпечують перехід від реактивного реагування до проактивного управління на основі прогнозних моделей.

Висновки. Сформовано науково обґрунтовану концепцію поетапного впровадження технології цифрових двійників в об'єднаній енергосистемі України на основі систематизації теоретичних засад, технологічних передумов та верифікованого міжнародного досвіду.

Аналіз архітектури цифрових двійників на основі класифікаційної тріади підтвердив, що переважна більшість промислових впроваджень в електроенергетиці відповідає рівню цифрової репрезентації фізичного об'єкта або системи, яка оновлюється в режимі реального часу, а не повноцінного ЦД із замкненим циклом управління. Перехід до рівня ЦД із строгаго розумінні залишається задачею, що потребує одночасного розвитку технологічної та нормативно-регуляторної бази. Аналіз архітектурних рішень і технологій-нейблерів виявив, що ефективна реалізація ЦД в енергетиці базується на конвергенції інфраструктури Інтернету речей, хмарних та периферійних обчислень, протоколу ІЕС 61850 і РМУ-вимірювань. Саме ця конвергенція

забезпечує необхідну якість і гранулярність даних для синхронізації фізичного та цифрового рівнів.

Дослідження методів інтеграції алгоритмів машинного навчання підтвердило технологічну зрілість LSTM для прогнозування часових рядів та RL для оптимізації диспетчерських рішень. Встановлено, що практична ефективність цих методів критично залежить від якості та однорідності навчальних вибірок, що для гетерогенної інфраструктури ОЕС є структурним обмеженням першого порядку.

Порівняльний аналіз функціональних можливостей ЦД та SCADA/EMS виявив якісну відмінність між реактивною спостережністю традиційних систем і предиктивною спостережністю ЦД із вбудованими алгоритмами машинного навчання. Задokumentовані показники реальних впроваджень — скорочення незапланованих простоїв на 25 % (GE Digital Wind Farm) та підвищення енергетичного виходу на 10–20 % (Huawei FusionSolar) – підтверджують економічну обґрунтованість переходу до проактивних стратегій технічного обслуговування.

Огляд практичних кейсів впровадження засвідчив, що найбільш відтворювані результати досягаються в умовах модульної архітектури ЦД із чітко визначеними інтерфейсами обміну даними та стандартизованими онтологіями активів. Відсутність уніфікованих міжплатформних стандартів залишається головним системним бар'єром масштабування.

Концепція поетапного впровадження ЦД в ОЕС України обґрунтована у вигляді трифазної дорожньої карти, методологічно узгодженої з досвідом National Grid ESO та адаптованої до інституційних і інфраструктурних реалій вітчизняної енергосистеми. SWOT-аналіз підтвердив принципову асиметрію між сильними сторонами інституційного характеру – досвідом інтеграції з ENTSO-E та кваліфікованим персоналом – і переважно технологічними та фінансовими слабкими сторонами, що визначає доцільність саме поетапної, а не форсованої стратегії. Ключовим індикатором успішності першої фази є досягнення стабільної синхронізації між фізичним та цифровим рівнями з мінімізацією похибки моделювання $\epsilon(t)$.

Список літератури

- Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification / W. Kritzing et al. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, no. 11. P. 1016–1022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.
- Grieser M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. Cham, 2016. P. 85–113. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- Digital twins in renewable energy systems: a comprehensive review of concepts, applications, and future directions / W. F. Mbasso et al. *Energy strategy reviews*. 2025. Vol. 61. 101814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101814>.
- Digital twin: enabling technologies, challenges and open research / A. Fuller et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998358>.
- A theoretical open architecture framework and technology stack for digital twins in energy sector applications / N. G. Gouriseti et al. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 13. 4853. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16134853>.
- Towards electric digital twin grid: technology and framework review / M. M. H. Sifat et al. *Energy and AI*. 2022. Vol. 11. 100213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100213>.

7. IEC 61850:2026 SER. Communication networks and systems for power utility automation. Effective from 2026-04-02. Official edition. Geneva : IEC, 2026.
8. International Renewable Energy Agency (IRENA). Digitalisation and AI for power system transformation: Perspectives for the G7. Abu Dhabi : IRENA, 2025. 68 p. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Oct/IRENA_INN_Digitalisation_AI_for_power-systems_2025.pdf.
9. IEC TR 61850-90-5:2012. Communication networks and systems for power utility automation - Part 90-5: Use of IEC 61850 to transmit synchrophasor information according to IEEE C37.118. Effective from 2012-05-09. Official edition. Geneva : IEC, 2012. 149 p.
10. Комунікаційні мережі та системи для автоматизації електроенергетичних підприємств. Частина 5. Технічні вимоги до функцій і моделей приладів. ДСТУ ІЕС 61850-5:2019. На заміну ДСТУ ІЕС 61850-5:2014 ; чинний від 2020-10-01. Вид. офіц. 2019.

References

1. W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
2. M. Grieves and J. Vickers, "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems," in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer Int. Publishing, 2016, pp. 85–113, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
3. W. F. Mbasso *et al.*, "Digital twins in renewable energy systems: A comprehensive review of concepts, applications, and future directions," *Energy Strategy Reviews*, vol. 61, Sep. 2025, Art. no. 101814, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101814>
4. A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998358>
5. N. G. Gourisetti, S. Bhadra, D. J. Sebastian-Cardenas, M. Touhiduzzaman, and O. Ahmed, "A theoretical open architecture framework and technology stack for digital twins in energy sector applications," *Energies*, vol. 16, no. 13, Jun. 2023, Art. no. 4853, doi: <https://doi.org/10.3390/en16134853>
6. M. M. H. Sifat *et al.*, "Towards electric digital twin grid: Technology and framework review," *Energy and AI*, vol. 11, Nov. 2022, Art. no. 100213, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100213>
7. *Communication Networks and Systems for Power Utility Automation*, IEC 61850:2026 SER, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2026.
8. International Renewable Energy Agency (IRENA), "Digitalisation and AI for power system transformation: Perspectives for the G7," IRENA, Abu Dhabi, Oct. 2025. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Oct/IRENA_INN_Digitalisation_AI_for_power-systems_2025.pdf
9. *Communication Networks and Systems for Power Utility Automation - Part 90-5: Use of IEC 61850 to Transmit Synchrophasor Information According to IEEE C37.118*, IEC TR 61850-90-5:2012, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2012.
10. *Communication Networks and Systems for Power Utility Automation - Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models*, IEC 61850-5:2013, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2013.

Надійшла (Received) 08.05.2026

Прийнята (Accepted) 16.05.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

UDC 621.311:004.94:004.896

HALYNA OMELIANENKO – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Professor of the Department of Electric Power Transmission, Guarantor of the Educational Program G3 "Electric Power Engineering", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-5476>; e-mail: omeljanenkgalina@gmail.com.

VALERII HURICHUK ✉ – Postgraduate Student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6958-1048>; e-mail: valerio.gurinchuk@gmail.com.

RESEARCH ON THE USE OF DIGITAL TWINS IN THE ENERGY SECTOR

The article is devoted to the systematization of conceptual principles and analysis of practical aspects of the application of digital twin technology in the energy industry. The relevance of the study is due to the accelerated digital transformation of energy systems, the growth of the share of renewable energy sources in the generation structure and the insufficiency of traditional dispatching control tools for solving the tasks of predictive monitoring and optimization of operating modes in conditions of increased stochasticity of loads. Based on a critical analysis of existing approaches, a study was conducted and it was established that for the electric power industry, a digital twin should be considered as a three-level cyber-physical system that covers the physical level, the data transmission and processing level, and the digital model level and provides continuous synchronization with a physical object in a mode close to real time. It is shown that the effective implementation of digital twins in the energy sector is based on the convergence of complex amplitude measurement devices, the IEC 61850 standard, cloud computing and big data processing tools, and the integration of machine learning algorithms extends the functionality of digital twins to state prediction, residual resource assessment and optimization of dispatching decisions. A comparative analysis of digital twins with dispatching control systems and real-time data collection was conducted, which showed that traditional systems provide mainly reactive control, while digital twins form predictive observability, support scenario modeling and a closed loop of optimizing control. The generalization of practical cases confirmed the economic and operational feasibility of using digital twins in the segments of electricity generation, transmission and storage, and the SWOT analysis of the implementation conditions in the energy system of Ukraine revealed both existing institutional prerequisites and significant technological, financial and cybernetic limitations. On this basis, a roadmap for the phased introduction of digital twins into the power system is substantiated – from a digital representation of a physical object or system, which is updated in real time at the substation level, to a full-fledged digital twin at the system-wide level.

Keywords: electric power system; renewable energy sources; digital twin; machine learning; neural networks; digitalization; hybrid physically-informed models.