

Цифрові двійники віртуальної електростанції

Вінницький національний технічний університет

Анотація У статті досліджено концепцію та архітектуру цифрових двійників (ЦД) для управління віртуальними електростанціями (ВЕС). Розглянуто роль цифровізації у трансформації сучасних енергосистем та перехід від простих імітаційних моделей до повноцінних цифрових копій із двостороннім обміном даними. Запропоновано стандартну модульну архітектуру ЦД, яка включає блоки моделювання, експлуатації, інженерії та аналітики даних. Особливу увагу приділено інтеграції алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування, кластеризації ресурсів та автоматизації звітності за допомогою великих мовних моделей. Визначено ключові аспекти кібербезпеки та виклики на шляху до стандартизації інтерфейсів даних на основі стандарту CGMES.

Ключові слова: Віртуальна електростанція (ВЕС), цифрові двійники (ЦД), розподілені енергоресурси (PER), штучний інтелект, машинне навчання, архітектура програмного забезпечення, кібербезпека, стандарт CGMES.

Abstract. The article explores the concept and architecture of digital twins (DT) for managing virtual power plants (VPP). It examines the role of digitalization in transforming modern energy systems and the transition from simple simulation models to full-scale digital copies with bidirectional data exchange. A standard modular DT architecture is proposed, including blocks for simulation, operation, data engineering, and data analytics. Special attention is paid to the integration of artificial intelligence and machine learning algorithms for forecasting, resource clustering, and reporting automation using large language models. Key cyber security aspects and challenges towards standardizing data interfaces based on the CGMES standard are identified.

Keywords: Virtual Power Plant (VPP), Digital Twins (DT), Distributed Energy Resources (DER), Artificial Intelligence, Machine Learning, software architecture, cyber security, CGMES standard.

Вступ

Цифровізація докорінно трансформує енергосистеми, виводячи їхню ефективність, гнучкість та екологічну стійкість на новий рівень. Процес розпочався ще кілька десятиліть тому з впровадження систем диспетчерського контролю (SCADA), що дозволило підвищити стабільність мереж та забезпечити точне прогнозування несправностей. Сучасні технології моніторингу дозволяють збирати колосальні обсяги даних, що сприяє створенню цифрових моделей для управління великою кількістю розподілених енергоресурсів (PER) [1].

У цьому контексті концепція віртуальних електростанцій (ВЕС) забезпечує децентралізоване управління сонячними панелями, вітрогенераторами та накопичувачами через єдину цифрову платформу [2]. Цифрові двійники (ЦД), що виникли в NASA у 2010 році як імітаційні моделі для моніторингу, еволюціонували у складні системи з двостороннім автоматизованим обміном даними між фізичним і цифровим світами. Справжній ЦД сьогодні має використовуватися не лише для спостереження, а й для прийняття короткострокових оперативних рішень та планування довгострокових модернізацій мережі.

Матеріал та результати дослідження

Віртуальна електростанція представляє сукупність географічно розкиданих PER, що потребують сучасних інструментів для координації в межах єдиного плану. ВЕС можуть охоплювати мережі мікрорайонів, міст, промислових парків або університетів [2].

Використання ЦД забезпечує цілісний підхід до моделювання та валідації всіх операцій, підвищуючи керованість, стабільність та відмовостійкість системи через моніторинг у реальному часі. ЦД допомагають долати невизначеність відновлюваної енергії шляхом аналізу сценаріїв та оцінки ризиків, а також забезпечують масштабованість через моделі агрегації ресурсів [3]. Така система визначається як модульна програмна екосистема, що відтворює роботу інфраструктури та забезпечує її планування. Ключовою особливістю ЦД ВЕС є використання мультифізичних моделей (динамічних, стаціонарних, теплових) у масштабах від окремих активів до системи систем. Для підтримки цих функцій цифрова платформа повинна інтегруватися з існуючими інструментами диспетчеризації та системами управління енергоспоживанням.

На шляху до стандартної архітектури ЦД

Запозичення концепцій із розробки програмного забезпечення дозволяє створити стандартну модульну архітектуру ЦД, що забезпечує автономність операторів ВЕС. Запропонована архітектура складається з чотирьох основних компонентів: моделей моделювання, моделей експлуатації та планування, блоків обробки та аналізу даних [4]. Блок моделювання базується на мультифізичних моделях, таких як потоки потужності, теплові та динамічні фазорні моделі, що вимагають постійного оновлення при впровадженні нових РЕР. Окремий модуль управління імітаційними моделями відповідає за контроль версій та синхронізацію з реальною системою. Компонент експлуатації та планування дозволяє керувати диспетчеризацією РЕР та інвестиціями, причому розділення цих функцій з фізичними моделями через інтерфейси даних полегшує оновлення системи.

Використання функціональних макетних блоків та стандарту CGMES забезпечує сумісність даних про обладнання та топологію мережі. Це створює умови для координації декількох ЦД у складі ВЕС, де кожен РЕР може мати локальний термінал для покращення масштабованості та надійності [5].

Робочий процес

Робочий процес ЦД ВЕС інтегрує часовий вимір у життєвий цикл експлуатації через безперервні цикли управління та планування. На початковому етапі створюється цифрова копія фізичної інфраструктури за допомогою мультифізичних моделей, тип яких залежить від конкретних завдань. Процес безперервного оновлення на основі подій, таких як реконфігурація мережі, становить «серцебиття» ЦД, гарантуючи відповідність моделі фізичній інфраструктурі. Контроль версій записів здійснюється за стандартом CGMES, що створює єдине джерело моделювання.

Такий підхід дозволяє операторам моделювати сотні реалістичних сценаріїв із мінімальними зусиллями, тестуючи зміни параметрів та збої ще до їхнього впровадження у фізичну мережу [1,3]. Це сприяє швидкій перевірці нових пристроїв та непрямій передачі знань через алгоритми штучного інтелекту. Проте синхронізація станів моделей із різною частотою дискретизації (від мілісекунд до годин) залишається складним науковим викликом.

Роль штучного інтелекту у розробці цифрових технологій для програм управління попитом ВЕС

Штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН) кардинально змінюють енергетичний сектор, забезпечуючи інтелектуальну функціональність ВЕС. Моделі МН полегшують аналіз великих масивів даних, виявляючи приховані закономірності для профілактичного обслуговування, а алгоритми кластеризації дозволяють ресурсам ВЕС самоорганізовуватися для надання допоміжних послуг. Алгоритми виявлення аномалій та імпуації даних гарантують найвищу якість інформації в базі даних ЦД.

Для подолання складності мультифізичних обчислень використовуються проксі-моделі на основі глибоких нейронних мереж, які здатні миттєво вирішувати задачі потоку потужності у великих мережах. Великі мовні моделі (ВММ) автоматизують створення звітів про інциденти

та документації, а також можуть автоматично генерувати файли конфігурації за стандартом CGMES.

Оптимізація ресурсів прискорюється за допомогою підкріплювального навчання, що дає змогу оперативно реагувати на зміни умов, хоча питання безпеки та дотримання обмежень залишаються актуальними. Генеративний ШІ допомагає прогнозувати рідкісні аварійні стани та створювати синтетичні сценарії для підвищення стійкості ВЕС [4].

Кібербезпека

Зростання рівня цифровізації підвищує вразливість РЕР до кіберзагроз, таких як витік даних, зловмисні команди або атаки типу «відмова в обслуговуванні» [5]. Для забезпечення безпеки ЦД ВЕС необхідно враховувати конфіденційність через шифрування, автентичність агентів через SIM-картки або криптографічні ключі, а також цілісність даних через управління життєвим циклом ключів. ШІ відіграє важливу роль у моніторингу трафіку та виявленні аномалій ще до того, як атака завдасть шкоди, а також у прогнозуванні вразливостей інфраструктури.

Принцип незаперечності є критичним для транзакційних ВЕС і може бути реалізований через цифрові підписи або довірені апаратні модулі. Забезпечення безперебійної доступності сервісів вимагає зміцнення апаратного та програмного забезпечення та створення надлишкової ІТ-інфраструктури. Хоча заходи безпеки здорожчують систему та можуть впливати на затримки, інтеграція принципів ЦД у механізми захисту дозволяє прогнозувати наслідки атак та демонструє переваги цифрової трансформації як засобу захисту.

Підсумовуючи, можна сказати, що хоча забезпечення безпеки ВЕС, яка використовує ЦД для прийняття рішень та планування, є цілком реальним, для досягнення такого рівня безпеки необхідно врахувати низку важливих факторів. Апаратне та програмне забезпечення, необхідне для безпечної системи, є дорожчим і вимагає постійної уваги, оновлень, аудиту та обслуговування протягом усього життєвого циклу. Крім того, впровадження таких заходів безпеки може вплинути на затримки в роботі системи та її масштабованість. Проте інтеграція принципів ЦД у механізми безпеки пропонує суттєві переваги, зокрема вдосконалене виявлення аномалій та прогнозування потенційних наслідків атак за допомогою штучного інтелекту. Це є прикладом передових технологій і демонструє, як цифрова трансформація може бути не лише джерелом потенційних викликів, а й рішенням.

Висновок

Впровадження цифрових двійників віртуальних енергосистем — від рівня окремих пристроїв до рівня віртуальної енергосистеми — залежить від успішного розгортання стандартних архітектур, що забезпечують безперебійну роботу та координацію. Інтерфейси даних також мають бути стандартизовані, щоб забезпечити простий обмін даними між централізованою цифровою моделлю віртуальної енергосистеми та, можливо, локальними цифровими моделями, розгорнутими на рівні РЕР. У цьому відношенні стандарт CGMES відіграватиме важливу роль, якщо його буде широко прийнято. Проте поки що не ясно, чи зможе стандарт CGMES підтримувати мультифізичні параметри в описі активів та компонентів. Оскільки ВЕС ЦД міститимуть кілька мультифізичних моделей, необхідні подальші дослідження та розробки для належного визначення функціональних можливостей модуля управління моделями симуляції, здатного забезпечувати контроль версій моделей.

Список використаної літератури

1. Лежнюк П.Д., Ластівка В. Б. Підвищення ефективності відновлювальних джерел енергії в електроенергетичних системах / В. Б. Ластівка, П. Д. Лежнюк // VIII Міжнародна студентська наукова конференція «Модернізація та сучасні українські і світові наукові дослідження», м. Луцьк, 24 січня 2025 р. – Луцьк, 2025. – С. 172. – ISBN 978-617-8440-45-9.
2. Малогулко Ю. В. Дослідження функціонування віртуальних електростанцій [Електронний ресурс] / Ю. В. Малогулко, Н. О. Пасло, В. Б. Ластівка // Матеріали LII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 21-23 червня 2023 р
3. Лежнюк П.Д., Ластівка В. Б. Оптимізація роботи відновлюваних джерел енергії в електроенергетичних системах / В. Б. Ластівка, П. Д. Лежнюк // Матеріали VI Міжнародної студентської наукової конференції «Міждисциплінарні наукові дослідження та перспективи їх розвитку», м. Миколаїв, 14 березня 2025 р. – Миколаїв, 2025. – С. 35. – ISBN 978-617-8440-58-9.
4. Лежнюк П.Д., Ластівка В. Б. Віртуальні електростанції як інноваційна концепція для агрегації ВДЕ [Електронний ресурс] / В. Б. Ластівка, П. Д. Лежнюк // VI Міжнародна науково-технічна конференція “Оптимальне керування електроустановками” ВНТУ, Вінниця, 22-23 жовтня 2025 р
5. Лежнюк П. Д. Спосіб оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. О. Рубаненко, І. О. Гунько // Державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій», 18 жовтня 2023 р. — 2023.

Лежнюк Петро Дем'янович - доктор техн. наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: lezhpd@gmail.com

Ластівка Вікторія Богданівна – студентка групи ЕСМ-25м, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: vlastivka19@gmail.com

Lezhniuk Petro – dr. eng. sc, professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Lastivka Vika – student, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.