

РОЗВИТОК ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ У РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ МІСЬКИХ РАЙОНІВ

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

У статті розглянуто концепцію цифрових двійників (Digital Twin) у контексті міських розподільчих мереж. Наведено приклади застосування для моніторингу, керування навантаженням, оптимізації інвестицій та підвищення ефективності енергетичних систем. Цифрові двійники дозволяють створювати точні віртуальні копії реальних об'єктів і систем, які можуть застосовуватись як для оперативного керування, так і для стратегічного планування розвитку інфраструктури.

Ключові слова: цифровий двійник, розподільчі мережі, моніторинг, оптимізація, енергетика.

Abstract

The article discusses the concept of Digital Twin in the context of urban distribution networks. It highlights the potential of creating accurate virtual replicas of physical systems to improve monitoring, load management, investment optimization, and overall efficiency of energy systems. Digital Twins serve as a powerful tool for both operational control and long-term strategic planning.

Keywords: Digital Twin, distribution networks, monitoring, optimization, energy.

Вступ

Сучасні енергетичні системи стикаються з багатьма викликами, серед яких швидке зростання споживання електроенергії, інтеграція відновлюваних джерел, зростання навантажень у міських районах та потреба у підвищенні надійності мережі. Цифрові двійники (ЦД) виступають інноваційним інструментом, що дозволяє створювати віртуальну копію фізичної інфраструктури.

Завдяки цьому оператори можуть здійснювати постійний моніторинг, виявляти відхилення у роботі системи, прогнозувати аварійні ситуації та розробляти оптимальні рішення для стабільного функціонування.

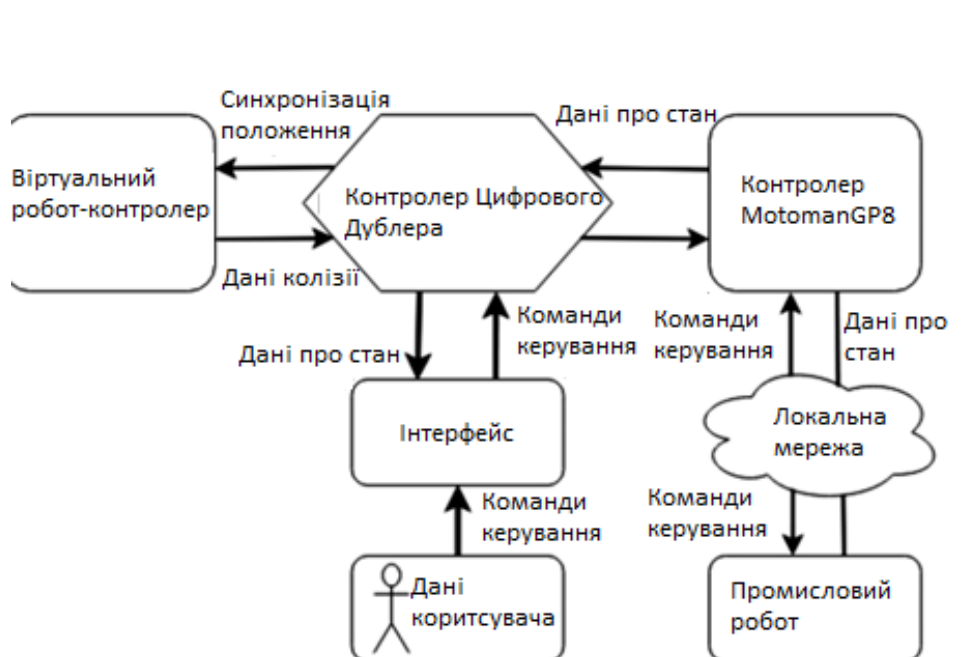


Схема роботи цифрового двійника

Основні функції цифрового двійника

Цифровий двійник — це поєднання фізичної системи, платформи збору даних і математичної моделі, яка дозволяє в реальному часі аналізувати стан об'єкта та прогнозувати його майбутню поведінку.

Ось його основні функції:

- 1) Моніторинг та діагностика – цифрові двійники дозволяють у реальному часі відслідковувати роботу електричних мереж, швидко виявляти аварії та локалізувати несправності.
- 2) Керування навантаженням – у пікові години цифровий двійник допомагає здійснювати оптимальний розподіл енергопотоків, щоб уникати перевантажень та зменшувати ризик відключень.
- 3) Інтеграція відновлюваних джерел – ЦД дозволяє балансувати енергію від сонячних, вітрових та інших генераторів, враховуючи їхню змінність і непередбачуваність.
- 4) Прогнозування розвитку – цифрові двійники застосовуються для планування модернізації мереж, вибору найбільш економічно вигідних рішень та мінімізації витрат.
- 5) Покращення кібербезпеки – цифрові моделі дозволяють перевіряти вразливості системи до кіберзагроз та створювати стратегії захисту без ризику для реальної мережі.

Переваги та недоліки

Переваги	Недоліки
Цифровий двійник дозволяє змодельовати безліч сценаріїв навантажень, екстремальних ситуацій, відмов компонентів та реагування на них у віртуальному середовищі, ще до їх прояву в реальній мережі. Це допомагає заздалегідь виявляти вузькі місця, перевантаження або fronti напруги.	Створення точного цифрового двійника потребує значних витрат на сенсори, інфраструктуру збору даних, ІТ-ресурси, програмне забезпечення, ліцензії, інтеграцію з існуючими системами. Часто рентабельність повернення інвестицій розраховується на доволі тривалий термін.
За умов наявності керуючих алгоритмів, цифровий двійник може виступати як підґрунтя для систем автоматичного або автономного управління мережею (наприклад, корекція напруг, керування реактивною потужністю, балансування потоків). Такий підхід підвищує гнучкість і швидкість реагування.	У багатьох мережах вже працюють системи SCADA, EMS, контроль, що мають власні протоколи та формати даних. Інтегрувати все це в єдину модель цифрового двійника, забезпечуючи коректний обмін даними — непросте завдання. Можуть виникати «острови даних» (data silos).
Цифровий двійник може слугувати мостом між сенсорними даними, системами збору (SCADA, AMI), аналітикою та рішенням — так, щоб усі ці складові працювали скоординовано. Це побудова більш єдиного інформаційного середовища мережі.	Потрібні фахівці з моделювання (електричні мережі, фізичні процеси), аналітики даних, інженери ІТ/ОТ, кібербезпеки, системні архітектори. Часто такі спеціалісти не знайдені на місцевому ринку або вимагають значної підготовки.

Завдяки сценарному моделюванню можна тестувати реакцію мережі на аварії, впроваджувати стратегії відновлення, резервування шляхів, визначати найуразливіші ділянки. Це допомагає підвищити стійкість мережі до навантажень чи ушкоджень.	Якщо дані, що надходять від сенсорів або систем моніторингу, мають шум, затримки, пропуски чи похибки, цифровий двійник може помилково інтерпретувати стан мережі. Моделі потребують коректної калібровки та валідації.
На основі цифрового двійника можна здійснювати «що-якщо» аналіз (scenario analysis) для вибору оптимальних варіантів оновлення мережі: де встановити нові трансформатори, де розширювати проводку, де слід впровадити системи компенсації реактивної потужності тощо. Це зменшує ризик надмірних інвестицій або недостатніх заходів.	Будь-яка модель — це апроксимація реальності. Вона може не враховувати всі нелінійності, асиметрії, погодні впливи, соціальні фактори споживання тощо. Проблема передавання невизначеності, коригування моделі в процесі експлуатації — складна задача.
З використанням моделювання та порівняння реальних і симульованих параметрів можна більш точно і швидко виявляти місця дефектів чи аномалій (наприклад, витoki струму, перевантаження, погані контакти).	Високоякісні цифрові двійники (hi-fi) вимагають значної обчислювальної потужності (моделювання, симуляції, аналіз, машинне навчання). Для великих мереж це може призвести до вузьких місць у продуктивності або необхідності масштабування хмарних рішень.
Якщо різні мережеві об'єкти (станції, підстанції, вузли, лінії) мають свої цифрові двійники і вони взаємодіють між собою, утворюється мережа моделей, що дає глибший аналітичний огляд і крос-координацію на вищому рівні.	Цифровий двійник — це потенційна «вхідна точка» для кіберзагроз. Якщо зловмисник отримає доступ до моделі або даних, він може маніпулювати керуванням мережі, змінювати сценарії, призводити до аварій. Необхідні надійні механізми аутентифікації, шифрування, моніторингу вторгнень, безпечні оновлення.

Висновок

Цифрові двійники є ключовим інструментом розвитку енергетики майбутнього. Їх впровадження у розподільчі мережі міських районів дозволяє створити гнучкі, надійні та стійкі системи, що відповідають сучасним викликам.

Втім, варто враховувати, що впровадження цифрових двійників пов'язане не лише з перевагами, а й із суттєвими ризиками та обмеженнями. Висока вартість та підтримка таких систем, потреба у спеціалізованих кадрах, складність інтеграції з наявною інфраструктурою, а також ризики кіберзагроз і відсутність уніфікованих стандартів можуть стати бар'єрами для їх широкого застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стаття «Development of Digital Twin for Load Center on the Example of Distribution» URL: https://www.researchgate.net/publication/347104577_Development_of_Digital_Twin_for_Load_Center_on_the_Example_of_Distribution_Network_of_an_Urban_District.
2. Стаття «Digital Twins in Energy Systems» URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/12/4787>.

Пасло Нікіта Олександрович - студент групи ес-24м, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: nikitapaslo5@gmail.com

Науковий наглядач: **Сікорська Олена Вікторівна** – доцент кафедри електричних станцій та систем.

Nikita Oleksandrovich Paslo - student of group es-24m, faculty of Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: nikitapaslo5@gmail.com

Supervisor: **Sikorska Olena Vicktorivna** – docent of the department of power plants and systems.