

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Інститут (факультет) _____ ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого _____
Кафедра _____ Електропостачання та енергоменеджменту _____

«До захисту в ЕК»
Директор інституту
_____ Сергій БЛАЖЕНКО _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

« ___ » _____ лютого 2024 р.

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Сергій БАЛЮТА _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

« ___ » _____ лютого 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності _____ 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(код та назва спеціальності)

електромеханіка» _____

освітньо-професійної програми «Електротехнічні системи

електроспоживання» _____

на тему: « Використання цифрових двійників при проектуванні та експлуатації систем електропостачання промислових об'єктів » _____

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ЕЛ-2-7М

_____ Ватилик Вікторія Валеріївна _____
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник _____ Куєвда Юлія Валеріївна _____
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Консультанти _____ (ім'я та прізвище) _____ (підпис)

_____ (ім'я та прізвище) _____ (підпис)

_____ (ім'я та прізвище) _____ (підпис)

Рецензент _____ Наталія ЛУЦЬКА _____
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) незарядженої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач _____
(підпис)

Київ – 2024 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Навчально - науковий інженерно - технічний інститут ім. акад. І. С. ГулогоКафедра Електропостачання та енергоменеджментуОсвітній ступінь магістрСпеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри ЕПЕМ

/Сергій БАЛЮТА/“20” листопада 2023 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Ватилик Вікторії Валеріївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Використання цифрових двійників при проектуванні та експлуатації систем електропостачання промислових об'єктівкерівник роботи Куєвда Ю.В., к.т.н., доц., доцент кафедри електропостачання і енергоменеджменту.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від “ 20 ”листопада 2023 року № 940-кв2. Строк подання здобувачем роботи 09 лютого 2024 року3. Вихідні дані до роботи: стандарты та наукова література з теми застосування цифрових двійників в електроенергетичних системах, програмне забезпечення створення та підтримки цифрових двійників, завдання для реалізації та дослідження процесу тестування диференціального захисту лінії електропередачі за допомогою цифрового двійника

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

1. Огляд концепції цифрових двійників. 2. Шляхи застосування цифрових двійників в електроенергетичних системах та огляд програмного забезпечення для цифрових двійників 3. Цифрові двійники пристроїв релейного захисту

5. Перелік графічного матеріалу _____

«Презентація до пояснювальної записки» 20 слайдів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____ 20 листопада 2023 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ З№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на магістерську роботу	20.11.2023 р.	Виконано
2	Вступ	21-22.11.2023р.	Виконано
3	Опрацювання літератури	23-29.11.2023р	Виконано
4	Загальний аналіз цифрових двійників	05.12.2023р	Виконано
5	Порівняння програмного забезпечення відомих широкому загалу компаній, яке використовується для створення та експлуатації цифрових двійників в електроенергетиці	15.12.2023р	Виконано
6	Застосування цифрових двійників в електроенергетиці	25.12.2023р	Виконано
7	Робота з цифровими двійниками, моделювання (програма Siprotec Siemens)	02.01.2024р	Виконано
8	Тестування диференціального захисту лінії електропередачі за допомогою цифрового двійника SIPROTEC 5		Виконано
9	Висновки	27.01.2024р	Виконано
10	Оформлення списку використаних джерел	29.01.2024р	Виконано
11	Оформлення пояснювальної записки	30.01.2024р	Виконано
12	Оформлення графічної частини роботи (презентація)	05.02.2024р	Виконано
13	Подання готової роботи для перевірки на плагіат	09.02.2024 р.	Виконано

Здобувач

_____ (підпис)

Вікторія ВАСИЛИК _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Юлія КУЄВДА _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Ватилик В.В. Використання цифрових двійників при проектуванні та експлуатації систем електропостачання промислових об'єктів.

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Національний Університет Харчових Технологій

Київ 2024

У магістерській роботі виконано дослідження можливостей використання цифрових двійників у сфері проектування та експлуатації систем електропостачання промислових об'єктів. Значна складність і розмір таких систем вимагають ефективних методів моніторингу, управління та діагностики для забезпечення безперебійної роботи та запобігання аварій.

У роботі розглядаються наступні аспекти:

1. Огляд концепції цифрових двійників: Досліджуються основні принципи цифрових двійників та їх потенціал у відтворенні реальних систем електропостачання в віртуальному середовищі.

2. Використання цифрових двійників у проектуванні: Аналізується можливість використання цифрових двійників для моделювання та віртуального тестування різних аспектів систем електропостачання перед їх фізичним впровадженням.

3. Застосування цифрових двійників у експлуатації: Вивчаються методи використання цифрових двійників для моніторингу, аналізу даних та прогнозування можливих проблем у реальному часі для забезпечення надійності та ефективності систем електропостачання.

Ця робота спрямована на розширення розуміння потенціалу цифрових технологій у сфері електроенергетики та впровадження їх у практичні застосування для поліпшення якості та надійності систем електропостачання промислових об'єктів.

Ключові слова: цифрові двійники, застосування DIGITAL TWINS, система моніторингу живлення, електроенергетика, енергосистеми, диференціальний захист лінії електропередач.

ANNOTATION

Vatylyk V.V. The use of digital doubles in the design and operation of power supply systems of industrial facilities.

141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics"

National University of Food Technologies

Kyiv 2024

In the master's work, a study of the possibilities of using digital twins in the field of design and operation of power supply systems of industrial facilities was carried out. The considerable complexity and size of such systems require effective methods of monitoring, control and diagnostics to ensure smooth operation and prevent accidents.

The work considers the following aspects:

1. Overview of the concept of digital twins: The main principles of digital twins and their potential in reproducing real power supply systems in a virtual environment are studied.

2. Use of digital twins in design: The possibility of using digital twins for modeling and virtual testing of various aspects of power supply systems before their physical implementation is analyzed.

3. Application of digital twins in operation: Methods of using digital twins for monitoring, data analysis and forecasting of possible problems in real time to ensure reliability and efficiency of power supply systems are studied.

This work is aimed at expanding the understanding of the potential of digital technologies in the field of electric power and their implementation in practical applications to improve the quality and reliability of power supply systems of industrial facilities

Keywords: digital twins, DIGITAL TWINS applications, power monitoring system, electric power industry, power systems, differential protection of power transmission lines.

Зміст

Вступ.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД КОНЦЕПЦІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ.....	11
1.1. Визначення цифрового двійника (Digital Twin).....	11
1.2. Цифровий двійник у життєвому циклі обладнання.....	13
1.3. Технічні аспекти цифрових двійників.....	18
1.4. Дизайн цифрових двійників.....	20
1.5. Стандарти та рамки цифрових двійників.....	25
1.6. Приклади впровадження цифрових двійників	27
Висновки до розділу1.....	32
РОЗДІЛ 2. ШЛЯХИ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ТА ОГЛЯД ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ.....	33
2.1. Управління життєвим циклом обладнання електроенергетичних систем.....	33
2.2. Порівняння традиційного моделювання та використання цифрових двійників у задачі управління життєвим циклом електроенергетичного обладнання.....	36
2.3. Переваги та недоліки застосування технології цифрових двійників в електроенергетичних системах.....	42
2.4. Застосування цифрових двійників та зміна методології проектування електроенергетичних систем.....	46
2.5. Тенденції розвитку та шляхи подальшого впровадження цифрових двійників.....	55
2.6. Порівняльний аналіз програмного забезпечення для цифрових двійників Висновки до розділу 2.....	66
РОЗДІЛ 3. ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ.....	68

3.1 Технології цифрових підстанцій та їх реалізація в програмному забезпеченні цифрових двійників пристроїв релейного захисту.....	68
3.2. Програмне середовище цифрового двійника пристрою релейного захисту.....	72
3.3. Тестування диференціального захисту лінії електропередачі за допомогою цифрового двійника SIPROTEC 5.....	76
Висновки до розділу 3.....	90
ВИСНОВКИ.....	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	92

ВСТУП

Актуальність теми дослідження

Тема використання цифрових двійників у проектуванні та експлуатації систем електропостачання промислових об'єктів є дуже актуальною в сучасному світі. Це пов'язано з ростом комплексності промислових систем, зокрема систем електропостачання, а також зі стрімким розвитком цифрових технологій і "інтернету речей" (IoT).

Цифрові двійники - це віртуальні моделі реальних об'єктів або процесів, які постійно оновлюються за допомогою даних з реальних пристроїв чи сенсорів. Вони можуть бути використані для моделювання, моніторингу, діагностики та оптимізації різних систем, включаючи системи електропостачання.

Зазначимо деякі аспекти, які роблять цю тему актуальною:

- оптимізація енергоефективності: цифрові двійники можуть допомогти збирати дані про споживання енергії, прогнозувати його та використовувати ці дані для підвищення енергоефективності систем електропостачання;
- моніторинг та діагностика: цифрові двійники дозволяють в реальному часі відслідковувати стан електрообладнання, виявляти проблеми та прогнозувати можливі відмови або поломки;
- прогнозування та управління: на основі даних, зібраних за допомогою цифрових двійників, можна розробляти алгоритми для прогнозування споживання електроенергії, управління навантаженням та оптимізації роботи системи;
- зменшення ризиків і аварій: цифрові двійники дозволяють вчасно виявляти потенційні проблеми або несправності в системі електропостачання та приймати заходи для їх усунення, що допомагає зменшити ризик аварій та збільшити надійність системи;
- підвищення продуктивності та зниження витрат: завдяки використанню цифрових двійників можна оптимізувати роботу систем

електропостачання, що призводить до зменшення витрат на електроенергію та підвищення загальної продуктивності промислових об'єктів.

Отже, використання цифрових двійників при проектуванні та експлуатації систем електропостачання промислових об'єктів є надзвичайно актуальною темою, яка може принести значні переваги в плані ефективності, надійності та енергозбереження.

Робота містить аналіз концепції цифрового двійника в електроенергетичній галузі, включаючи визначення, переваги, архітектури та необхідні будівельні блоки для її реалізації. В роботі проілюстровано практичні застосування цифрових двійників та визначено:

- основні характеристики цифрового двійника,
- відносини між цифровими двійниками для формування складених систем,
- роль цифрових двійників у життєвому циклі сутностей, розглядаючи сценарії з цифровими двійниками та без них і бізнес-цінності цифрових двійників,
- огляд стандартів для цифрових двійників, які можуть бути враховані при розробці цифрових двійників,
- приклади використання цифрових двійників у різних галузях промисловості.

Об'єктом дослідження даної роботи є цифрові двійники як ключова частина цифрової трансформації галузі електроенергетики. Вони створюють точну віртуальну копію фізичних об'єктів, активів і систем для підвищення продуктивності, оптимізації операцій і збільшення прибутку.

Предметом дослідження є визначення та оцінка стандартів, практики та характеристик, які найкраще підходять для цілісних вирішень цифрових двійників і висвітлення прогалін там, де це необхідно; визначення моделей розгортання та наскрізних функцій, які стосуються шаблонів і характеристики для розгортання цифрового двійника.

Метою роботи є дослідження роботи цифрових двійників в електроенергетиці. Для досягнення поставленої мети в роботі були сформульовані наступні завдання:

1. Аналіз концепції цифрових двійників;
2. Переваги та недоліки використання технології Digital Twin в електроенергетичній галузі;
3. Приклади практичного застосування цифрових двійників в електроенергетичних системах;
4. Порівняння та огляд програмного забезпечення цифрових двійників;
5. Перевірка застосування цифрових двійників в області релейного захисту.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД КОНЦЕПЦІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

1.1. Визначення цифрового двійника (Digital Twin)

Цифровий двійник (**Digital Twin**) за визначенням ІС Consortium [76]– це формальне цифрове представлення деякого активу, процесу чи системи, яке фіксує атрибути та поведінку цієї сутності та придатне для обміну інформацією, зберігання, інтерпретації або обробки в певному контексті.

Інформація про цифрового двійника включає комбінації наступних категорій (але не обмежується ними):

- модель і дані на основі фізики,
- аналітичні моделі та дані,
- дані часових рядів та історичні дані,
- транзакційні дані,
- основні дані,
- наочні моделі,
- обчислення.

Для зображення цифрового двійника далі буде використана піктограма, зображена на рис.1.1, яка відображає, що цифровий двійник є багатогранним.



Рис. 1.1

Рівень абстракції цифрового двійника повинен відповідати вимогам використання, для яких розроблено цифровий двійник.

Дискретний цифровий двійник – це єдиний об’єкт, який використовується без необхідності подальшого розбиття. Наприклад, редуктор або двигун для кульового млина в гірничодобувній промисловості можна контролювати і аналізувати на цьому рівні об’єкта. Складання дискретних цифрових двійників для створення композитного цифрового

двійника показано на рис. 1.2 як вертикальне розширення, яке описує збільшення складності від одного до багатьох об'єктів.

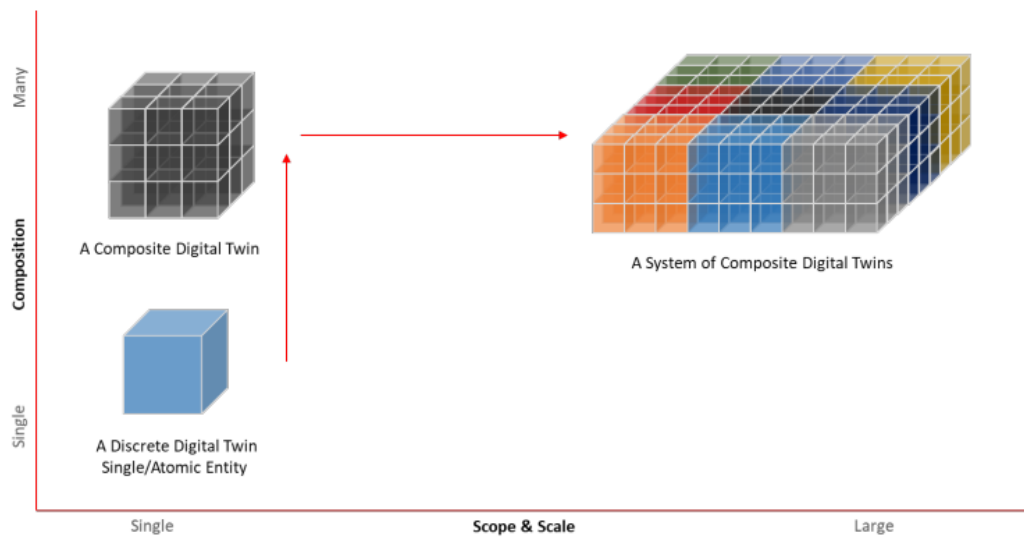


Рис.1.2

Композитний цифровий двійник – це комбінація дискретних цифрових двійників, які представляють об'єкт що складається з кількох окремих компонентів або частин. Композиція може відбутися на різних рівнях. Наприклад, виробнича комірка – це складений об'єкт, цифровий двійник якого складається з цифрових двійників пристроїв у виробничій комірці. Весь завод – це система, цифровий двійник якої складається з кількох інших складених цифрових двійників.

Як показано на рис. 1.3, зв'язки між цифровими двійниками в композиції можуть бути такими:

Ієрархічний: як і аналоги в реальному світі, набір компонентних цифрових двійників може бути зібраний у цифровий двійник обладнання, набір цифрових двійників обладнання можна зібрати у цифровий двійник виробничої лінії, набір цифрових двійників виробничої лінії можна зібрати в заводський цифровий двійник тощо.

Асоціативний: існують асоціації між цифровими двійниками, як і їхні аналоги в реальному світі. Цифровий двійник газопроводу пов'язаний з цифровим двійником для видобутку та споживанням газу.

Одноранговий (рівноправний) зв'язок: одноранговий зв'язок спостерігається в групі обладнання однакового або схожого типів, яке виконує однакові або подібні функції. Загальний ефект від усього обладнання – це проста сума ефекту, створеного кожною частиною обладнання. Наприклад, у вітряній електростанції група двигунів вітряних турбін утворюють композитний цифровий двійник вітряної турбіни.

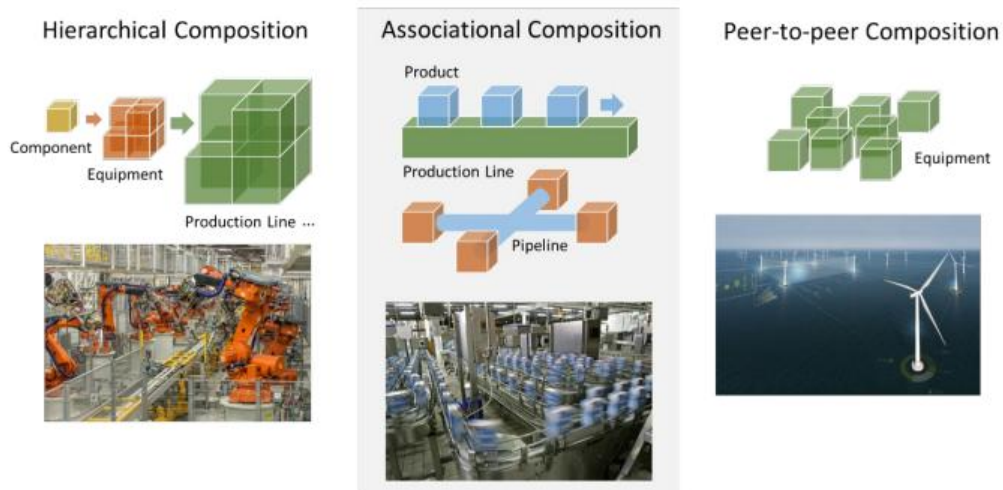


Рис.1.3

1.2. Цифровий двійник у життєвому циклі обладнання

Як показано на рис. 1.4, інформація про об'єкт зазвичай розкидана між кількома джерелами інформації, які розробляються та підтримуються різними організаціями. Це призводить до порушення потоку інформації протягом життєвого циклу об'єкта, оскільки ці інформаційні джерела можуть не обмінюватися інформацією належним чином. Деяка інформація може дублюватися або бути суперечною, а деяка інформація може бути відсутня. У результаті, потрібен значний час, щоб знайти відповідну інформацію, перетворити її у відповідний формат і реалізувати семантичні зв'язки в ній. Крім того, це може призвести до суперечливих оперативних даних, що призводять до неправильного прийняття рішень. На доданок, інформаційні «бульбашки» перешкоджають застосуванню передових методів, таких як розширена аналітика та штучний інтелект, які вимагають доступу до великої кількості інформації.

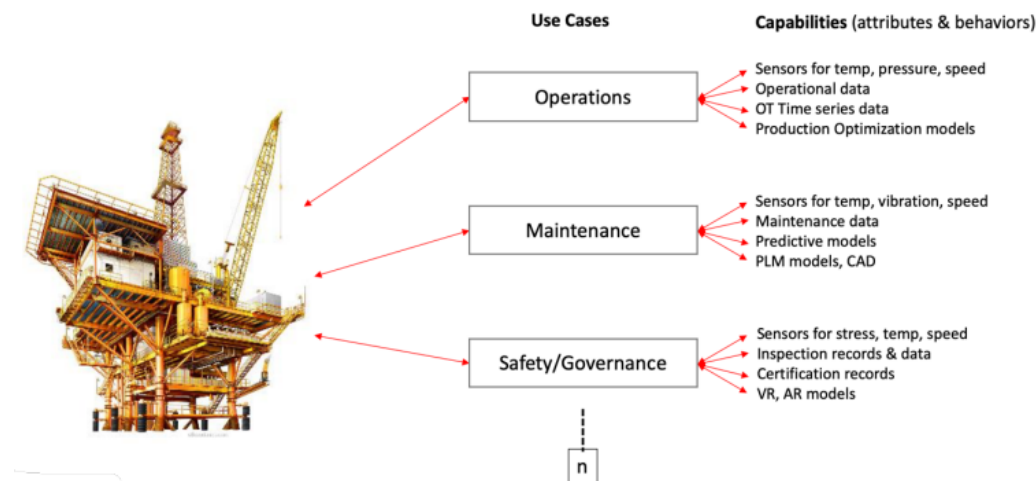


Рис.1.4

На рис. 1.5 показано, як цифрові двійники допомагають вирішити проблему інформаційної «бульбашки». Цифровий двійник служить проксі-сервером, який централізовано збирає дані для кожної організації, а потім робить цю інформацію доступною для різних сфер бізнесу для їхніх конкретних програм через інтеграційні інтерфейси, такі як прикладні програмні інтерфейси (APIs). Це покращує процес прийняття рішень через спільне розуміння робочого стану та знижує загальні витрати протягом життєвого циклу експлуатації та обслуговування установки.

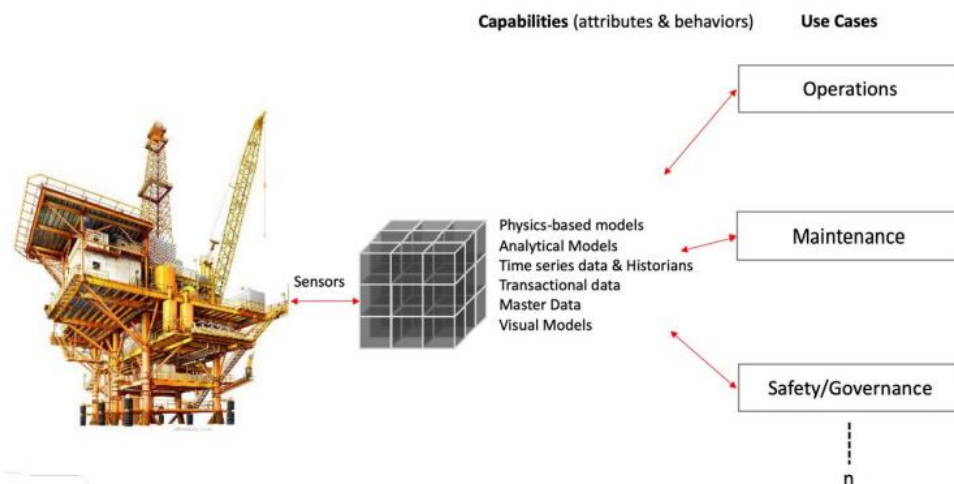


Рис.1.5

На рис. 1.6 показано приклад того, як цифрові двійники еволюціонують протягом життєвого циклу об'єкта виходячи за межі організації. У виробничих системах виробник може додавати нові типи продукції до каталогу типів. Клієнт вибирає, які типи продуктів він бажає придбати з

каталогу, а потім оформляє замовлення. Продукт виготовляється і відправляється замовнику. Водночас замовник може використовувати різні інструменти проектування та віртуального введення в експлуатацію щоб проектувати продукт, визначати його параметри та взаємодію з іншими продуктами підприємства. Коли клієнт отримує продукт, він встановлює його на підприємстві, вводить в експлуатацію. На етапі експлуатації виробу можуть застосовуватися різні послуги з технічного обслуговування. Інформація про технічне обслуговування може використовуватися клієнтом для коригування майбутнього вибору продуктів. Виробник може бути проінформований про виявлені проблеми в продукті, і скористатися цією інформацією для підвищення якості свого продукту.

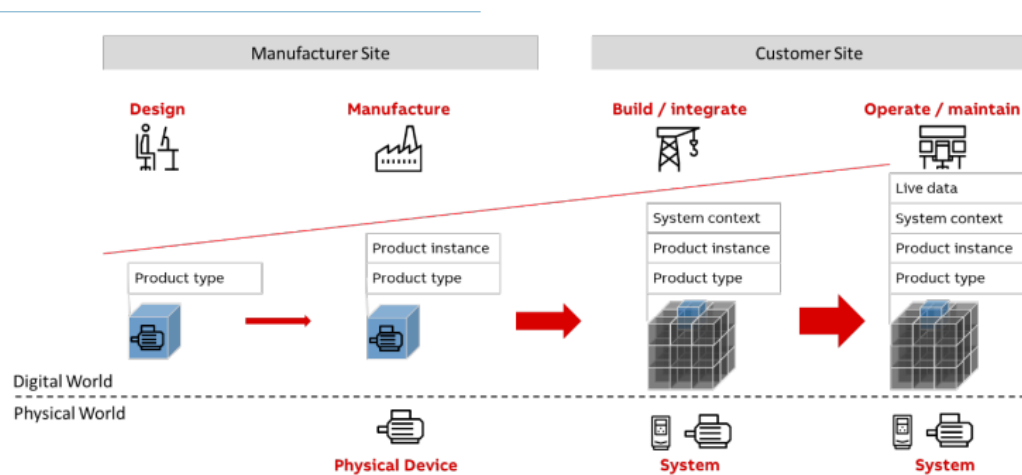


Рис.1.6

Наведений вище простий приклад показує потік інформації через межу між виробником і замовником. Сьогодні цей потік значною мірою перерваний. Наприклад, в межах однієї компанії може бути кілька інструментів для вибору, проектування та віртуального введення в експлуатацію, які погано пов'язані один з одним і не можуть обмінюватися інформацією між собою.

Операційна інформація про продукт може зберігатися у прошивку (firmware) продукту; інформація про технічне обслуговування зберігається у спеціальних базах даних і відключена від фази вибору. Навіть якщо є договірна угода про надсилання частини інформації про експлуатацію та

технічне обслуговування виробникам, ця інформація розкидана в базах даних і прошивці продукту, і ми не можемо легко та своєчасно об'єднати цю інформацію економним, точним і швидким способом.

Цифровий двійник об'єкта є засобом і єдиним інтерфейсом доступу до інформації про його життєвий цикл. Цифрові двійники можуть бути створені для будь-якого об'єкту, який становить інтерес для організації. В нашому прикладі, виробник може створити цифрових двійників для групи продуктів одного типу, включивши всю відповідну інформацію, таку як аналіз ринку, креслення автоматизованого проектування, документацію та інформацію про продуктивність, отриману від замовника. Вони також можуть створити цифрового двійника для свого продукту та зберігати інформацію про виробництво та обслуговування отриману від клієнта в цьому цифровому двійнику. Це забезпечує виробника єдиним інтерфейсом для доступу до всієї інформації про продукт і тип продукту, і може мати значення для багатьох компаній. Можуть бути окремі цифрові двійники для одного об'єкту, оскільки контекст відрізняється, а інформація використовується по-різному.

Існують також семантичні зв'язки між цифровими двійниками різних об'єктів які є в реальному світі. Якщо їх не вдається встановити, цифрове зображення залишиться без зв'язку між собою в інформаційній «бульбашці». Оскільки інформація надходить з різних джерел, в різний час і в різних форматах, налагодження автоматичної підтримки таких зв'язків є однією із основних проблем у розробці цифрових двійників.

Пропонуючи єдину точку входу для доступу до інформації життєвого циклу об'єктів, а також підтримуючи зв'язки між інформацією в одному цифровому двійнику та між кількома цифровими двійниками, можна досягти різноманітних бізнес переваг. Наприклад:

Цифрові двійники можуть служити основою для розширеної аналітики та додатків штучного інтелекту для використання та збагачення вмісту цифрових двійників. Крім того, розширена аналітика та додатки штучного

інтелекту можуть бути частиною цифрового двійника, що робить його інтелектуальним і самодостатнім об'єктом.

Не завжди можливо виміряти кожен важливий фізичний параметр, який цікавить. Цифрові двійники можна використовувати для розробки високоякісних програмних датчиків або віртуальних датчиків за допомогою моделей на основі фізики, які вбудовані у цифровий двійник і служать проксі для фізичних вимірювань.

Може виникнути потреба в розширеній аналітиці та моделюванні за допомогою цифрового двійника основного процесу для прогнозування майбутньої поведінки.

Вимірювання, отримані від датчиків, які повідомляють про робочі параметри об'єкта, не завжди точні через збій або відхилення в роботі датчика. Коли аномалії виникають через несправність датчика, а не через будь-яку базову операційну несправність фізичного об'єкта, не потрібно видавати сигнали тривоги та уникати зайвих відключень. Фізичні моделі та цифровий двійник, що представляє об'єкт, можна використовувати для узгодження даних, щоб покращити якість вимірювань і переконатися, що отримані вимірювання дійсно справжні. Наприклад, у цифровому двійнику електростанції простий масово-тепловий баланс у контурі може допомогти узгодити дані, а також виявляти можливі збої датчиків.

Цифрові двійники спрощують спільне проектування на всіх етапах життєвого циклу. Це скорочує час, витрачений на пошук, експорт та імпорт інформації про інструменти, необхідні для будь-якого завдання життєвого циклу.

Цифрові двійники можуть вирішити проблеми з експлуатацією або обслуговуванням, які інакше призвели б до зайвих простоїв.

Цифрові двійники підвищують якість, оскільки багато помилок у виробництві спричинені використанням неправильної або застарілої інформації.

Цифрові двійники можуть бути доступні будь-кому, будь-де та будь-коли. Обмін досвідом у всьому світі забезпечує цілодобове обслуговування та швидкий час реагування при максимальному використанні експертів. У випадку, якщо впровадження потребує експлуатації на місці, можна залучити місцевого інженера, а віддалені експерти можуть надати підтримку.

Тому цифрові двійники забезпечують систематичну методологію, технологію та інструменти для представлення складного фізичного та логічного середовища та забезпечення ефективного моніторингу, діагностики, передбачення та планування дій фізичних і логічних об'єктів.

1.3. Дизайн цифрових двійників

Щоб динамічно представляти об'єкти в реальному світі, екземпляри цифрових двійників повинні бути під'єднані до відповідних двійників в реальному світі, іноді в режимі реального часу, для збору й упорядкування даних відповідних об'єктів реального світу. Цифровий двійник повинен уможливити обчислення та аналітичні моделі для аналізу цих даних для опису, діагностики, прогнозування та моделювання станів і поведінки об'єктів і систем реального світу. Інформацію, отриману в результаті такого аналізу можна поєднати з бізнес-логікою та цілями, щоб призначити дії для оптимізації виробничих процесів. Щоб досягти цього, дизайн цифрового двійника повинен включати сервісні інтерфейси для інтелектуальних промислових додатків для доступу до даних і аналітичних результатів.

Як показано на рис. 1.7, цифровий двійник складається з даних, обчислювальних моделей (далі просто «моделі») та сервісних інтерфейсів, так само, як об'єкт в об'єктно-орієнтованій мові програмування має дані, методи та інтерфейси.

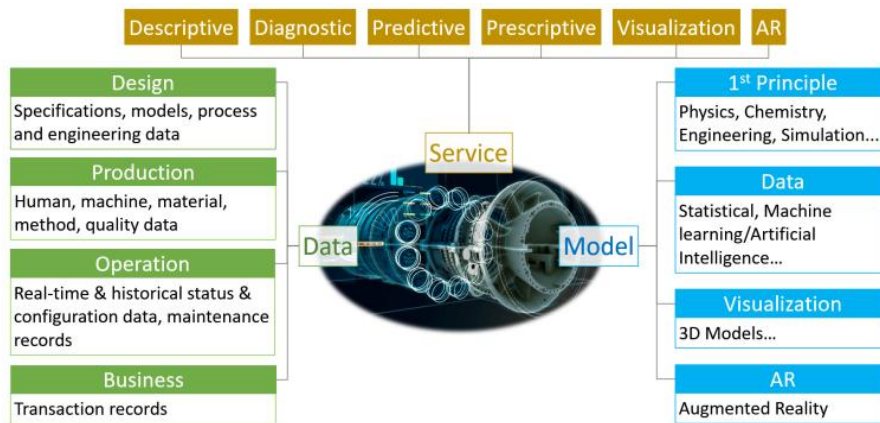


Рис.1.7

Дані: цифровий двійник повинен містити дані про свого реального двійника, які потрібні моделям для представлення та розуміння станів і поведінки реального двійника. У багатьох випадках, він може складатися з даних повного життєвого циклу об'єкта реального світу, у випадку з обладнанням, даних на етапі проектування (технічні характеристики, моделі проектування, виробничий процес та інженерні дані), етапі виробництва (дані про працівника, виробниче обладнання, матеріали та деталі, методи виробництва та дані щодо забезпечення якості), етапі експлуатації (дані про встановлення та конфігурацію, поточний та історичний стан і статус, а також записи про технічне обслуговування) і навіть процедурні дані про закінчення терміну служби. Він також може містити бізнес-дані, такі як записи транзакцій.

Моделі: Цифровий двійник повинен містити обчислювальні або аналітичні моделі, за допомогою яких можна описувати, розуміти та передбачати робочі стани та поведінку двійників, а також моделі для планування дій та прийняття рішень на основі бізнес-логіки та цілей щодо відповідних об'єктів реального світу. Ці моделі можуть включати моделі, засновані на фізиці або хімії, інженерні або імітаційні моделі, моделі даних на основі статистики, машинного навчання та штучного інтелекту (ШІ). Вони також можуть включати 3-D моделі та моделі доповненої реальності для сприяння розумінню людиною робочих станів або поведінки об'єктів реального світу.

Сервіс (інтерфейс): цифровий двійник повинен містити набір сервісних інтерфейсів для промислових програм або інших цифрових двійників для доступу до його даних і використання його можливостей.

Хоча форма та вміст об'єктів реального світу дуже різняться, повинні існувати інваріантні конструкції високого рівня з деякими загальними атрибутами даних і моделями в кожному цифровому двійнику, щоб до них можна було отримати доступ і викликати їх за допомогою загального підходу.

Як показано на рис.1.8, ми можемо побудувати цифрові двійники відповідно до типів їх аналогів у реальному світі. Екземпляри створюються на основі шаблонів типів відповідно до конфігурації середовища. Подібним чином ми можемо встановити логічні зв'язки між примірниками відповідно до їх типів.

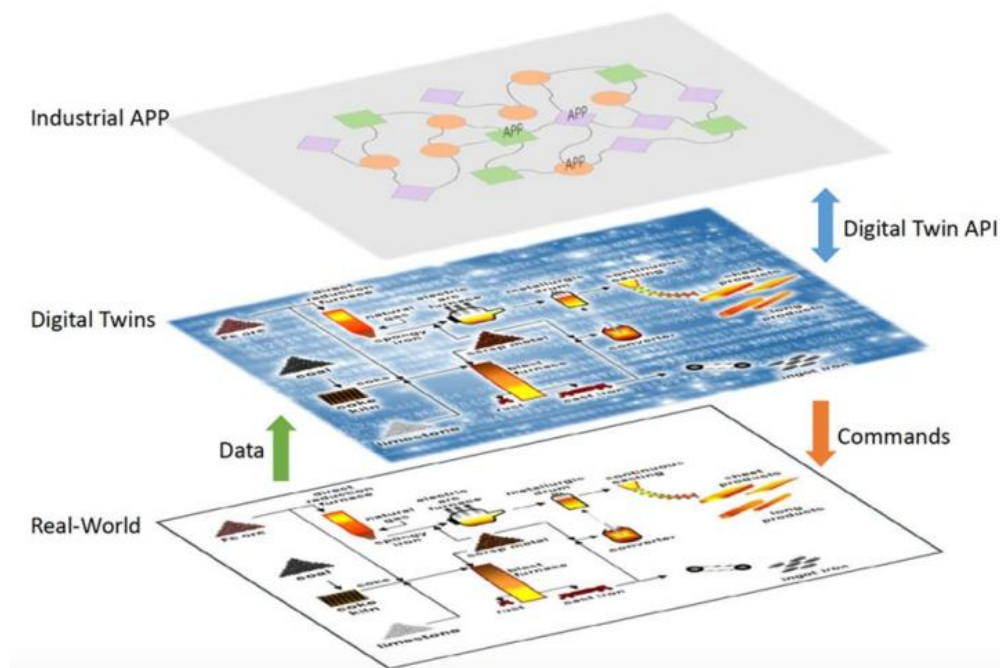


Рис.1.8

1.4. Технічні аспекти цифрових двійників

Рис. 1.9 показує деякі технічні аспекти цифрового двійника; кожен з яких пояснюється нижче.



Рис.1.9

Інформаційне моделювання: ключовим елементом цифрового двійника є інформація, яка пов'язана з різними фазами життєвого циклу основного об'єкту. Для цього необхідно прийняти різні ключові рішення відношення. Приклади:

- мета-модель для цифрових двійників, що описує необхідні внутрішні моделі для способів використання (use cases),
- механізми структурування та модулювання вмісту цифрових двійників і розширення вмісту, коли нові види інформації стають доступними протягом життєвого циклу об'єкта,
- стандарти, які необхідно прийняти для визначення структури та змісту цифрових двійників для полегшення обміну інформацією між компаніями,
- механізми порівняння існуючої інформації з такими стандартами,
- механізми для моделювання зв'язків між інформацією в одному цифровому двійнику,
- засоби для моделювання різних видів цифрових двійників.

Інформаційна сукупність: Інформація про цифрових двійників надходить з різних джерел. Деякі з них можуть зберігатися всередині цифрових двійників. Наприклад, якщо спеціалізована аналітична програма використовує вміст цифрового двійника як вхідні дані, програма може зберігати результати аналізу лише у самому цифровому двійнику. Необхідно

прийняти різні ключові рішення щодо передачі інформації з джерел інформації в цифрових двійниках, таких як механізми для:

- заповнення інформації з різних джерел, таких як пристрої, програми, бази даних або інші цифрові двійники,
- копіювання інформації в цифрових двійниках або для посилання на інформацію з цифрового двійника або їх комбінація на вимогу,
- кешування інформації,
- заповнення онлайнової та офлайнової інформації (наприклад, для онлайн моніторингу реальних об'єктів або в офлайнових симуляційних тестах).

Інформаційна синхронізація. Тут слід враховувати:

- засоби для синхронізації інформації між цифровим двійником і відповідними джерелами інформації в обох напрямках від джерела інформації до цифрового двійника і навпаки,
- механізми для синхронізації інформації між декількома цифровими двійниками, які беруть участь у різних формах композиції,
- політики (такі як безпека та частота синхронізації) для виконання інформаційної синхронізації,
- стандарти та засоби забезпечення взаємодії цифрових двійників та їх інформації,
- джерела для полегшення синхронізації інформації.

Прикладні програмні інтерфейси (API): цифрові двійники взаємодіють з іншими компонентами. Щоб полегшити взаємодію, мають бути встановлені наступні API:

- які підходять для різних типів додатків (наприклад, додатки моделювання в реальному часі, додатків аналітики та додатків штучного інтелекту), які споживають і заповнюють контент цифрових двійників,
- для взаємодії з іншими цифровими двійниками, можливо, між постачальниками,

- для взаємодії з відповідним базовим об'єктом для полегшення збирання інформації з об'єкта та контролю над ним,

- для взаємодії з іншими джерелами інформації для розширення та синхронізації інформаційного вмісту цифрових двійників.

Необхідно прийняти різні ключові рішення щодо API доступу до інформації, наприклад:

- механізми офлайн-доступу до інформації (наприклад, форма файлів у різних форматах),

- механізми онлайн-доступу до інформації (наприклад, у формі RESTful API),

- механізми масового або потокового обміну інформацією,

- API для взаємодії на рівнях хмари, периферії та пристрою (наприклад, хмара-хмара, пристрій-хмара та хмара-пристрій),

- стандарти для API для полегшення взаємодії між постачальниками.

Зв'язок є ключовим фактором для взаємодії з цифровими двійниками та між ними. Необхідно прийняти різні ключові рішення щодо підключення, наприклад:

- механізми для однозначної ідентифікації цифрового двійника та його базової сутності для встановлення зв'язку між ними,

- механізми для автоматичного виявлення основного об'єкта в мережі для встановлення відповідності та обміну даними з цифровим двійником,

- механізми для виявлення інших цифрових двійників для встановлення з'єднання між ними,

- стандарти підключення для полегшення взаємодії між постачальниками.

Розгортання: цифрові двійники можна розгортати на спектрі від кінцевої точки до хмари відповідно до вимог програми. Рішення зазвичай ґрунтується на таких факторах, як:

- вимоги до затримки та часу відповіді,

- сумісність та інтеграція з іншими системами,

- вимоги до контролю,
- вимоги до складності та потужності аналітики.

Для розгортання цифрових двійників, нам потрібні механізми, щоб:

- розгорнути вміст цифрового двійника в таких місцях, як пристрій IoT, периферія та хмара,
- виявити окремі цифрові двійники, розподілені у різних місцях, щоб утворити зведений елемент цифрових двійників,
- підтримати поліморфні цифрові двійники, що означає можливість розгортання цифрового двійника у різних формах у різних місцях розгортання.

Як показано на рис. 1.10, один екземпляр слід розглядати як головну робочу копію з основними моделями, основними даними та пов'язаними з ними визначеннями, які зберігаються та керуються в сховищі. Інші екземпляри можна адаптувати для різних програм, наприклад, офлайн-екземпляри для цілей моделювання та онлайн-екземпляри для віддаленого моніторингу. В останньому випадку інформація буде оновлена порівняно з реальним аналогом для відображення реального світу («основна правда»). Іноді цифровий двійник може бути розгорнутий поряд із аналогом у реальному світі для здійснення моніторингу на місці або аналізу активу аналога в реальному світі для надання зворотного зв'язку, майже в реальному часі для оптимізації експлуатації об'єкта.

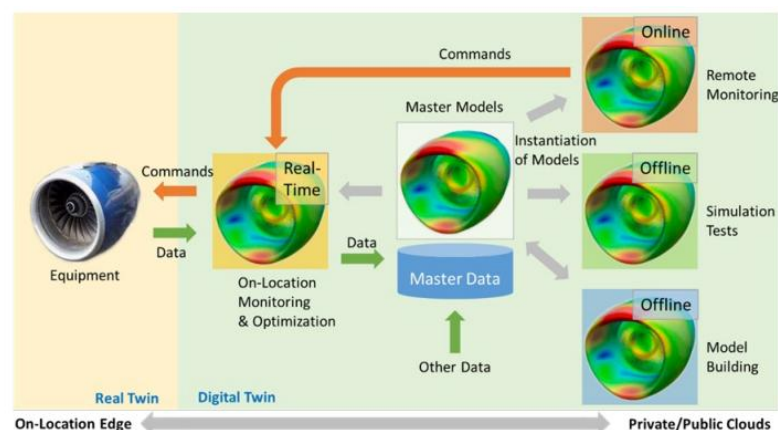


Рис.1.10

Безпека: взаємодія цифрових двійників з різними об'єктами має різні міркування безпеки. Необхідно прийняти різні ключові рішення щодо розгортання цифрових двійників, наприклад:

- механізми безпечного доступу до вмісту одного цифрового двійника, наприклад, за допомогою рольового контролю доступу,
- механізми безпечного доступу до окремих цифрових двійників, що надходять від різних постачальників, що утворюють композитні цифрові двійники,
- механізми для забезпечення взаємодії з основним об'єктом через його цифрового двійника,
- методи забезпечення автентичності інформації, моделей та інших метаданих як ідентифікаційні дані інших сторін, їхні криптографічні ключі та їхні права доступу і привілеї,
- методи безпечного розгортання цифрових двійників і забезпечення виконання правильних, непідроблених версій програмного забезпечення для підвищення надійності рішення, яке може допомогти захистити інтелектуальну власність певних типів цифрових двійників,
- методи для допомоги у вирішенні суперечок якщо необхідно встановити походження або час будь-якої інформації.

Інтероперабельність – це «здатність двох або більше систем або програм обмінюватися інформацією і взаємно використовувати інформацію, якою обмінювалися». Міжнародні стандарти або взаємоузгоджені протоколи зв'язку необхідні для визначення синтаксису інформації, семантики інформації, очікуваної поведінки та політики обміну інформацією, для досягнення сумісності. [1] Необхідно прийняти різні ключові рішення щодо сумісності аспектів цифрових двійників. Приклади:

- механізми та стандарти для забезпечення взаємодії кількох цифрових двійників один з одним,
- механізми та стандарти для забезпечення взаємодії різних додатків з цифровими двійниками,

- механізми та стандарти для забезпечення взаємодії цифрових двійників із їхніми основними об'єктами,
- механізми та стандарти для забезпечення взаємодії цифрових двійників з основними джерелами інформації.

1.5. Стандарти та рамки цифрових двійників

Існують різні види діяльності щодо стандартизації цифрових двійників, навіть якщо вони прямо не називаються «цифровим двійниками». IEC 62832 — це встановлений стандарт, який визначає структуру цифрової фабрики з представленням активів цифрової фабрики в її центрі, хоча він прямо не називається цифровим двійником. ISO/IEC JTC1 надав звіт про технологічні тенденції своєї спільної консультативної групи з нових технологій та інновацій (JETI). У звіті «цифровий двійник» визначено як область номер один, яка потребує глибокого аналізу, де JETI також розглядає, як можна налагодити співпрацю з спільнотою відкритих кодів. [2]

У 2019 році консультативна група ISO/TC 184 зазначила, що не існує «стандартної основи в рамках ISO для архітектури даних «цифрового двійника». [3] В результаті було сформовано групу для вивчення формалізації цифрового двійника. Крім того, у 2019 році асоціація стандартів IEEE ініціювала проект IEEE P2806, метою якого є визначення системної архітектури цифрового представлення фізичних об'єктів у заводських середовищах. Аналогічний підхід застосовано в стандарті Digital Twin Manufacturing Framework ISO/AWI 23247 у рамках ISO TC 184/SC4/WG15. Цей фреймворк дозволяє використати технологію plug & play для цифрових двійників, зосереджуючись головним чином на інтерфейсах та функціях цифрових двійників.

Німецька платформа Industrie 4.0 запустила Asset Administration Shell 4 як впровадження цифрового двійника для інтелектуального виробництва, IEC PAS 63088. Це було поглиблене партнерством між Францією, Італією та Німеччиною. [5]

ISO TS 18101-1 «надає вимоги, специфікації та вказівки щодо прозорої архітектури відносно постачальників промислової цифрової екосистеми» з акцентом на сумісність нафти та газу. У цьому контексті цифровий двійник визначається як «цифровий актив, на якому можна надавати послуги, які створюють цінність для організації». Цифрові активи не обов'язково вважаються фізичними.

Діяльність із відкритим кодом також все більше стає у центрі уваги. У проєкті Eclipse BaSyx⁶, пропонуються перші комплекти розробки програмного забезпечення (SDK), засоби перегляду та редактори для розробки цифрових двійників які відповідають специфікації Asset Administration Shell. У складі Eclipse IoT⁷ Eclipse Ditto в поєднанні з Eclipse Vorto пропонують загальний фреймворк цифрових двійників .

Окрім класичних організацій із розробки стандартів (SDO), таких як Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) і Міжнародна електротехнічна комісія (IEC), інші консорціуми в контексті IoT, такі як W3C Web of Things (WOT), працюють над специфікаціями цифрового представлення речей.

1.6. Приклади впровадження цифрових двійників

Різні компанії та дослідники пропонують велику кількість прикладів цифрових двійників. У цьому розділі наведено кілька прикладів із різних областей.

1.6.1. Цифровий двійник у виробництві

Комерційний літак складається з кількох частин постачальника, таких як двигуни, шасі та авіоніка. У результаті цифровий двійник літака є комбінацією цифрових двійників цих частин.

Авіакомпанії – це оператори, які зазвичай купують або орендують літак у компанії, відповідальної за весь літак. Як наслідок відповідальність за цифрового двійника літака на момент доставки нестиме виробник літака. Виробник у свою чергу покладався б на двійники основних частин літака, як-от двигуни від виробника. Ці двійники повинні мати можливість взаємодіяти

на одній або сумісних платформах. З часом такі двійники потрібно обслуговувати при експлуатації.

Що стосується бізнес-цінності, цифровий двійник літака допомагає з прогнозованим технічним обслуговуванням, ефективністю роботи (наприклад, економії палива) і розробленню стратегії обслуговування активів. Враховуючи, що термін служби літака часто становить кілька десятиліть а вартість технічного обслуговування протягом усього терміну експлуатації може перевищувати початкову вартість літака, наявність цифрових двійників є ключовими перевагами.

1.6.2. Цифровий двійник в енергетиці та комунальних послугах

Процес гранулювання, ефективний контроль пічного обладнання та установки в цілому необхідні для досягнення високого рівня продуктивності печі, енергоефективності та відповідності специфікаціям якості.

Як показано на рис. 1.11, цифровий двійник печі для гранулювання працює в парі з системою розподіленого управління установкою. Цей цифровий двійник використовується для безперервної оптимізації роботи в режимі реального часу, пропонуючи оператору оптимальні налаштування. Цифровий двійник включає попередню обробку даних та інформації, імітаційну модель поведінки обладнання (на основі даних і фізики) і модулі самонавчання та прийняття рішень (які оптимізують входи з урахуванням процесу, якості, безпеки та екологічних обмежень).

Цифровий двійник використовує як дані, отримані з понад 7000 датчиків, так і програмні датчики з фізичною основою для прогнозування невідомої швидкості потоку, температури та складу перероблених газів.

Цифрові двійники для металургійного заводу включатимуть:

- цифровий двійник рівня обладнання, який контролює кожне обладнання,
- підблоки, які забезпечать цифровий двійник рівня обладнання будівлі,
- зв'язок між цифровими двійниками та існуючими системами управління,

- цифровий двійник рівня процесу, який контролюватиме обладнання в межах процесу,
- цифровий двійник на рівні заводу, який контролюватиме всі операції заводу.

Розглядаючи вимоги до сумісності, необхідно враховувати стандарти сумісності для зв'язку між блоками, як пояснюється нижче.

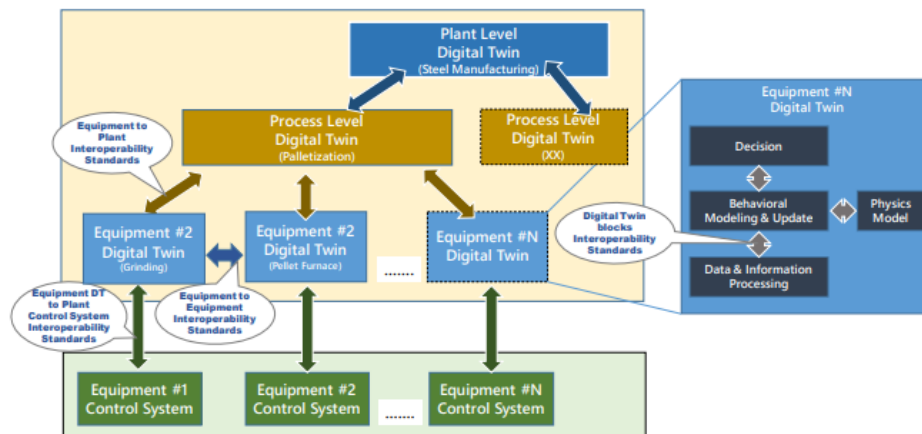


Рис.1.11

В цьому сценарії цифрові двійники забезпечують такі бізнес-цінності:

- оптимізація в режимі реального часу контролює ключові параметри керування, щоб забезпечити 2% зниження споживання палива та 3% підвищення пропускної здатності,
- обчислення в режимі реального часу різних параметрів якості, таких як міцність палет на стиск і робочих параметрів печі, таких як температура шару, допомагає операторам приймати швидкі та точні рішення без необхідності проведення лабораторних тестів і припущень.

1.6.3. Цифровий двійник у нафто та газодобуванні

Цифровий двійник для моніторингу підземних свердловин для життєвого циклу нафтової свердловини починається з розвідки, де для запуску свердловини використовуються імітаційні моделі на основі сейсмічних та інших підповерхневих даних. Цифровий двійник підземного моніторингу свердловин є композитною системою; модель буріння

складається з чотирьох унікальних незалежних елементів, кожен з яких є цифровим двійником.

Це надра, стовбур свердловини, бурове і наземне обладнання. Надра, в свою чергу, охоплюють навколишню геологію, резервуар і приствольні пласти. Щоб отримати цільові функції для виконання під час будівництва свердловини, ці чотири інтегровані первинні елементи даних є прикладами того, що потрібно моделювати:

- траєкторія стовбура свердловини,
- фізика бурильної колони,
- контроль тиску,
- склад і цілісність колектора (біля стовбура свердловини).

Моніторинг датчиків свердловини і бурової установки в поєднанні з можливостями штучного інтелекту колекторів, які сканують величезні обсяги геологічних та історичних даних про видобуток у цифровому двійнику, забезпечують оперативний контроль і взаємодію між підземним резервуаром і поверхневими операціями. Цифровий двійник підземного моніторингу свердловин розвивається протягом життєвого циклу свердловини, щоб вирішити додаткові випадки використання під час завершення, виробництва, технічного обслуговування.

Цифровий двійник підземного моніторингу свердловин пропонує такі бізнес-цінності:

- він забезпечує механізм для оцінки стратегій скорочення витрат, якісної оптимізації роботи персоналу та виробництва активів. Ці цифрові двійники забезпечують краще розуміння фінансових, технічних та експлуатаційних параметрів для керування свердловинами в режимі реального часу.
- цифровий двійник підземного моніторингу свердловин може покращити загальний індекс цілісності свердловини і процесів будівництва свердловин, підтримуючи розробку ефективних і гнучких робочих процесів

будівництва свердловини та полегшуючи прийняття рішень щодо найбільш вигідні альтернативи розвідки, бурінню, завершенню та видобутку.

1.6.4. Цифровий двійник у гірничодобувній галузі

Цифровий двійник для гірничодобувної діяльності з акцентом на обробці активів включає в себе інформацію, необхідну для прийняття найкращих рішень щодо технічного обслуговування, незалежно від того, відбувається це на основі умов чи прогнозування. Крім того, він надає інформацію для визначення пріоритетів планування робочого замовлення на основі параметрів і показників фактичного стану активів.

Цифровий двійник Processing Asset Health використовується в усьому бізнесі, тому йому потрібен доступ до різних систем, щоб переконатися, що відображена інформація є точною та актуальною для активу та рівня деталізації, який цікавить користувача.

Цей цифровий двійник взаємодіє з:

- системами управління активами підприємства (EAM),
- краєзнавством та історією підприємства,
- IT-системами замовника,
- існуючими системи контролю.

У цьому сценарії цифрові двійники забезпечують такі бізнес-цінності:

- здатність покращити середній час напрацювання на відмову та середній час відмови в наданні допомоги з методами управління ефективністю активів шахти. Це можливо завдяки тому, що інформація доступна ближче до реального часу, ніж це можливо раніше. Поєднання цієї інформації із ключовою інформацією із системи EAM об'єднує різну системну інформацію в цифровий двійник, щоб допомогти приймати ключові рішення.

- він реалізує повний потенціал шахт для мінімізації втрат заводу через проблеми технічного обслуговування.

Це підвищує точність планування, що, у свою чергу, допомагає переходити до більшого моніторингу на основі стану та, зрештою, прогнозний моніторинг активів.

- це зменшує загальні витрати за рахунок більшої прозорості в стані активів і графіках технічного обслуговуванні.

1.6.5. Цифровий двійник в автоматизації процесів

Цифровий двійник партії хімічного продукту об'єднує всю необхідну інформацію про партію продукту. Цікавою інформацією є виробничі параметри (такі як температура, тиск і вологість) під час виробництва конкретної партії.

Цифровий двійник надає інформацію для моніторингу відповідних аспектів (в'язкість, значення рН і агрегатний стан) поточного стану продукту. На основі цих даних моделювання може бути виконано для прогнозування оптимальних параметрів виробництва для подальших етапів обробки, щоб гарантувати заплановану якість продукції.

Зміни у властивостях продукту можна реєструвати в базі даних часових рядів, що дає змогу відстежити перевищення критичних для якості значень щодо часу та місця таким чином визначити причину. Ці функції роблять цифрового двійника продукту ключовою частиною процес управління якістю.

Оскільки цифровий двійник партії хімічного продукту дає змогу ознайомитися з історією даних цієї партії, її можна доставити замовнику на додаток до реального продукту. Зібрані дані підтримує клієнта на подальших етапах обробки або в кінцевому використанні.

У цьому сценарії цифрові двійники забезпечують такі бізнес-цінності:

- прозорість і відстежуваність виробничих параметрів можуть використовуватися в заявах на регрес,
- погана якість продукту може бути виявлена безпосередньо, що перешкоджає подальшому виконанню дорогих етапів виробництва,

- аналіз якості продукції та параметрів попереднього виробництва веде до подальших знань у виробництві.
- загальну якість продукту можна покращити завдяки інтелектуальному моделюванню виробничих параметрів.

Висновки до розділу 1

Хоча більшість компаній пропонують цифровий двійник як частину своєї пропозиції IoT, поняття цифрових двійників існувало до IoT під іншими назвами та іншими визначеннями. Як результат, існували різні інтерпретації цифрових двійників, зумовлені випадками використання в яких цифрові двійники відіграють роль. Не зважаючи на те, що набір рішень, з якими стикаються архітектори при проектуванні різних цифрових двійників збігаються, це різноманітне розуміння цифрових двійників є перешкодою для пропозиції загальних абстрактних архітектур, для цифрових двійників та їх положення в промислових системах.

У цьому розділі надано конкретне визначення цифрового двійника і детально описано сценарії, за якими цифровий двійник відіграє важливу роль у підвищенні ефективності поточних випадків використання та наведені нові варіанти використання. Перераховані технічні аспекти та рішення для проектування цифрових двійників лежать в основі подальшого розвитку цифрових двійників [8]. У цьому контексті двома важливими атрибутами якості цифрових двійників є безпека та взаємодія, саме вони визначають подальший їх розвиток найближчим часом.

РОЗДІЛ 2. ШЛЯХИ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ТА ОГЛЯД ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

2.1. Управління життєвим циклом обладнання електроенергетичних систем

Сучасна електроенергетична система – це складна технічна система, розвиток якої спрямований на впровадження відновлюваної генерації, розподіленої генерації, накопичувачів електроенергії, розвиток Smart Grids та технологій передачі електроенергії надвисокої напруги. Ці нововведення зумовлюють різко мінливий характер виробництва та споживання електроенергії, що збільшує навантаження, особливо на високовольтне обладнання. Наголошується на необхідності посилення моніторингу технічного стану об'єктів виробництва електроенергії, мереж передачі та розподілу, електроустановок споживачів. Крім того, часті відмови елементів енергосистеми є наслідком низької керованості та спостережуваності об'єктів енергосистеми.

З метою продовження терміну служби обладнання та підтримки його працездатного стану на всіх етапах життєвого циклу в енергетиці впроваджуються різноманітні системи моніторингу та діагностики стану енергетичного обладнання [28].

Відповідно до [29] під життєвим циклом системи розуміється сукупність процесів, що описують стан системи від етапу формулювання технічних вимог до етапу її виведення з експлуатації.

Кожна система будь-якої структури та призначення зазвичай розглядається в контексті часу її застосування. При проектуванні та експлуатації системи будуються такі моделі, які відображають зміну властивостей досліджуваного об'єкта. Для цього створюються імітаційні моделі, які називаються моделями життєвого циклу. Модель життєвого циклу сегментована на кілька етапів, оскільки це полегшує планування, підготовку та експлуатацію системи. Сегментація залежить від висунутих вимог, що

відповідають періоду застосування системи та механізмів прийняття рішень, спрямованих на зниження ризику функціонування системи [30].

Етапи (або фази) життєвого циклу складають структуру, в межах якої процеси досліджуваної системи описуються певними моделями. Початок і кінець кожного етапу представляють точки прийняття рішення. Кожен етап має свої завдання, і перехід від одного етапу до іншого є однозначною подією. Порядок, послідовність і тривалість етапів життєвого циклу та їх кількість унікальні для кожної системи. Процеси життєвого циклу (система, програмне забезпечення, сервіс) можуть бути запущені одночасно, ітераційно та рекурсивно, залежно від етапу, що знаходиться в центрі уваги [30]. У таблиці 1 наведено типові етапи життєвого циклу енергетичного обладнання.

Таблиця 1

<i>Етап</i>	<i>Опис</i>
Підготовчий етап	Викладення основних вимог та правил оформлення проектної документації
Технічне завдання на дизайн проекту	Детальна розробка вимог, створення технічного завдання
Проектування системи	Планування та проектування будівництва, патентний пошук, узгодження вимог до системи та обладнання
Будівництво та інсталяція	Монтаж і тестування спроектованих установок і систем
Введення в експлуатацію	Перевірка проекту, виконавчої документації, налагодження та випробування установок
Дослідна експлуатація	Апробація системи, проведення випробувань, що підтверджують працездатність системи відповідно до ТУ та проектної документації, введення системи в експлуатацію
Робота обладнання, технічне обслуговування та ремонт	Експлуатація обладнання відповідно до інструкцій та стандартів, забезпечення стабільної, надійної та безпечної роботи системи
Виведення з експлуатації	Архівування та утилізація

Життєвий цикл є комплексним показником періоду існування системи, що розглядається. На кожному етапі життєвого циклу та при переході від одного стану системи до іншого на основі поточного технічного стану та нормативної документації приймаються рішення про зміну параметрів системи та продовження або скорочення кожного етапу життєвого циклу. Описаний процес називається управлінням життєвим циклом. Управління життєвим циклом ускладнюється впливом різноманітних зовнішніх факторів (економіка, ринкові сигнали, політика, клімат тощо) та факторів, що описують систему чи об'єкт (досвід експлуатації та складність технологічних процесів тощо).

У [30] визначено такі принципи, що стосуються моделі життєвого циклу:

- протягом життєвого циклу система проходить певні уніфіковані стадії;
- тривалість кожного етапу змінюється в залежності від кількох внутрішніх і зовнішніх факторів і може бути змінена різними керуючими діями;
- перехід від одного етапу до іншого описується якісною зміною параметрів системи в залежності від експертного ранжування критеріїв, що відображають виконання завдань кожного етапу;
- критерії переходу від одного етапу до іншого ґрунтуються на цілях зниження ризиків і залежать не лише від нормативних документів, а й від ретроспективних даних функціонування конкретної системи.

Існують різні методи оцінки ефективної тривалості кожного етапу життєвого циклу. Методологія переходу між етапами базується на оцінці фізичного зносу та старіння активів, що знаходяться у фокусі. Зношення першого роду характеризується значним зниженням витрат на виготовлення обладнання за рахунок появи аналогів з кращими властивостями і характеристиками. Застарілість другого роду трактується по-різному. Методологія вибору економічно вигідних умов може базуватися на наступному:

- порівняння знижених витрат на старе та нове обладнання;
- оцінка тривалості та структури ремонтного циклу з використанням інформації технічної діагностики та відповідних інформаційних систем.

2.2. Порівняння традиційного моделювання та використання цифрових двійників у задачі управління життєвим циклом електроенергетичного обладнання

З метою підвищення ефективності етапу проектування використовується метод моделювання. Метод полягає в заміні спроектованої системи моделлю, де проводяться експерименти для отримання інформації про її роботу за різних керуючих впливів та умов середовища. Імітаційна модель є динамічною моделлю, де процеси розглядаються лише на зростаючому масштабі часу [31].

Основними цілями моделювання є [31]:

- опис поведінки системи;
- побудова гіпотези;
- прогнозування поведінки системи;
- відтворення процесу функціонування системи в часі зі збереженням елементарних фізичних явищ та їх структури з метою отримання інформації про стан системи в майбутньому.

Моделювання передбачає імітацію процесу експлуатації об'єкта з метою висвітлення проблем і пошуку шляхів забезпечення надійної роботи обладнання за різних вимог і умов. До вхідних параметрів, у цьому випадку, відносяться параметри технічного стану, пов'язані з процесом роботи обладнання, ймовірності виникнення різних станів, тривалість певного стану, ймовірність відмови. Моніторинг дозволяє в режимі реального часу оцінювати технічний стан обладнання або процесу, що дозволяє коригувати заходи щодо його обслуговування та ремонту.

Моделювання також дає можливість вирішити такі проблеми:

- недостовірна та суперечлива інформація;

- багатокритеріальна постановка задачі проектування енергетичного обладнання;
- неможливість чіткого формулювання мети;
- наявність неявних обмежень і зв'язку між ними;
- динамічна зміна зовнішніх умов;
- мінімізація браку обладнання, що виникає внаслідок помилок на етапі проектування;
- визначення умов розвитку системи.

При порівнянні моделювання з іншими математичними підходами можна виділити наступні особливості:

- ітераційний процес (для уточнення оцінки стану системи);
- використання методів статистичного моделювання;
- попередня обробка інформації з метою уточнення вхідних даних;
- використання різноманітних методів моделювання.

Для визначення та прогнозування технічного стану об'єкта енергосистеми, планування та коригування графіків технічного обслуговування та ремонту (ТО) енергетичного обладнання розроблені та застосовуються різні методи математичного аналізу [32]. Сьогодні системи розробляються на основі великих даних з використанням алгоритмів машинного навчання. У цьому випадку на виході є оцінка поточного технічного стану обладнання або прогнозні значення основних параметрів стану [32]. Однак застосування цих методів не дозволяє без участі експерта приймати рішення щодо оптимізації роботи енергетичного обладнання в залежності від зовнішніх умов і вимог. Концепція цифрового двійника дозволяє врахувати всі описані вище недоліки класичного імітаційного підходу.

Концепція цифрових двійників може бути ефективно використана для координації всіх етапів життєвого циклу енергетичного обладнання шляхом накопичення ретроспективних даних з різних джерел і даних про поточний

технічний стан. Цифровий двійник може використовуватися як єдине джерело даних про блок енергетичного обладнання, що використовується для реалізації підтримки прийняття рішень щодо його подальшої експлуатації. Ця концепція дозволяє моделювати, контролювати, діагностувати технічний стан об'єкта контролю [33].

На етапі експлуатації за допомогою технології цифрових двійників можна реалізувати динамічний моніторинг будь-якого процесу чи обладнання в режимі реального часу. Застосування концепції цифрового двійника для безперервного моніторингу технічного стану сприяє локалізації несправностей, попередженню аварійних подій та контролю якості технологічного процесу або окремої одиниці енергетичного обладнання [33].

У той час як стандартні математичні моделі базуються на розв'язанні алгебраїчних диференціальних рівнянь, обчисленні частинних похідних, історичних даних і експертних оцінках, технологія цифрового двійника також включає дані моніторингу та діагностики поточного стану системи для побудови моделі.

На відміну від імітаційних моделей, цифровий двійник, завдяки наявності зворотного зв'язку між фізичним об'єктом і моделлю, допускає саморегулювання при зміні стану системи. Після обробки даних на інформаційному рівні та передачі їх на прикладний рівень модель перераховується. Потім формуються рекомендації щодо оптимізації роботи системи та управління життєвим циклом енергетичного обладнання. Наприклад, у статті [34] представлено підхід до діагностики несправностей паливних елементів за допомогою цифрового двійника. Цифровий двійник побудований на основі термодинамічної моделі з оновленням даних датчиків у реальному часі. Діагностика несправностей здійснюється шляхом розрахунку та оцінки вектора залишку. Якщо вектор залишку перетинає поріг виявлення несправності, несправність локалізується за допомогою чутливого залишку.

Використовуючі цифрові двійники можна оцінювати та керувати

технічним станом конкретного блоку енергообладнання протягом усього життєвого циклу. Навпаки, під час моделювання можлива лише оптимізація етапу проектування.

У цьому випадку математична модель потрібна не тільки для того, щоб зрозуміти, як працює об'єкт або процес. Він також описує структуру, властивості та закони взаємодії з навколишнім світом, щоб навчитися керувати об'єктом або процесом, а також визначити найкращі способи керування ним. Крім того, найважливіше для технології цифрових двійників – передбачити наслідки впливу на об'єкт або процес. Таким чином, можна оцінювати та керувати технічним станом конкретного вузла енергетичного обладнання протягом усього життєвого циклу.

Таким чином, цифровий двійник дозволяє використовувати поточні дані з об'єкта дослідження, ретроспективні дані з одного (у випадку екземпляра цифрового двійника) або кількох (у разі агрегування цифрового двійника) об'єктів, забезпечує фізико-математичне моделювання з можливістю прогнозування життєвого циклу енергетичного обладнання, як показано на рис. 2.1

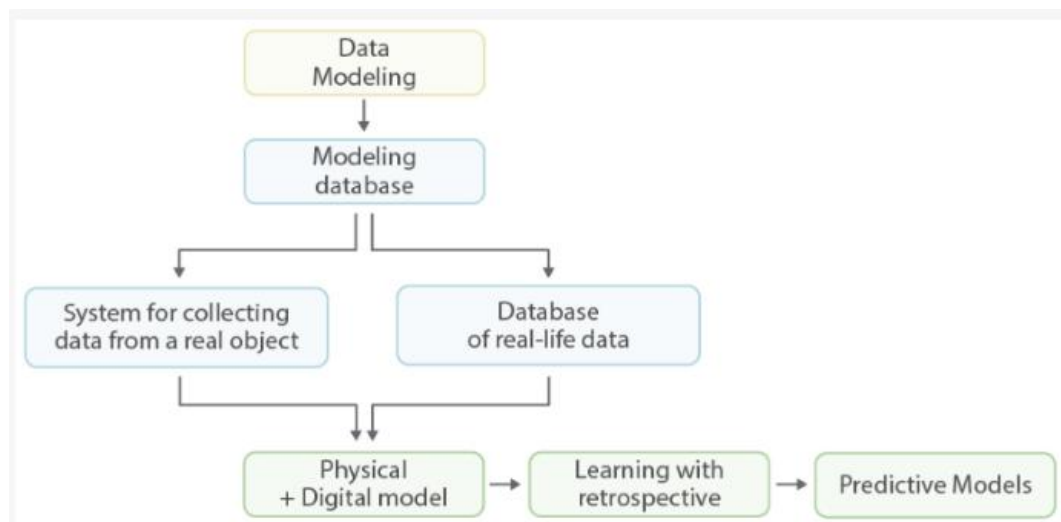


Рис.2.1.

Технологія цифрового двійника допомагає скоординувати всі етапи життєвого циклу досліджуваного обладнання або процесу, оскільки враховуються не тільки статистичні, нормативні та ретроспективні дані, а й дані моніторингу та діагностики поточного стану.

Виходячи з вищевикладеного, застосування технології цифрового двійника може мати велике значення для вирішення проблем управління технічним станом енергетичного обладнання, яке виступає в якості керованого даними інтелектуального програмного засобу, здатного:

- пропонувати рішення щодо оновлення та побудови планів ЗМ;
 - надати рекомендації щодо вибору стратегії МР;
 - планово-профілактичний ремонт;
 - технічне обслуговування з контролем стану;
- впровадити управління даними обладнання для різних бізнес-процесів;
- симулювати розробку, виробництво та впровадження обладнання;
- зменшити ризики впровадження інноваційних рішень;
- аналізувати та прогнозувати технічний стан обладнання на будь-якому етапі його життєвого циклу.

Зазвичай розробка об'єкта енергосистеми включає чотири етапи: проектування, переведення проекту у виробництво, виготовлення та випробування прототипу і, нарешті, запуск промислового виробництва. У традиційній парадигмі більшість оновлень дизайн-проекту відбувається протягом фази розробки. Крім того, кількість оновлень дизайн-проекту та пов'язані з цим витрати різко зростають від етапу проектування до комерційного виробництва.

При використанні цифрового двійника, завдяки можливості враховувати вимоги з різних етапів розробки, моделювати зовнішні та внутрішні процеси, а також синхронізувати різні джерела інформації, стає можливим концентрувати необхідні зміни та оновлення, зміщувати та мінімізувати витрати на стадії проектування. Більш того, такий цифровий двійник має сенс використовувати на наступних етапах життєвого циклу.

У [35] наведено приклад застосування концепції цифрового двійника з використанням віртуальної та доповненої реальностей. Віртуальна реальність за допомогою 3D-симуляції дозволяє операторам зануритися в середовище

цифрового двійника. Технологія доповненої реальності допомагає передавати віртуальну інформацію у фізичне середовище. Таким чином, розробники мають можливість тестувати об'єкти на віртуальних симуляторах, скорочуючи витрати на збірку та час на проведення реальних експериментів на етапах розробки та проектування. Ці технології цифрового двійника також можуть бути застосовані на інших етапах життєвого циклу, щоб інженерний персонал був занурений у середовище цифрового двійника для аналізу режимів роботи досліджуваного обладнання та виявлення потенційних дефектів на ранніх етапах розробки.

Фактично технічне обслуговування та ремонт можна назвати інструментом управління життєвим циклом енергетичного обладнання. Зараз у всьому світі відбувається перехід від планового профілактичного обслуговування до технічного обслуговування за умовами. Планування профілактичних робіт базується на стандартах і нормативних документах без урахування фактичного технічного стану обладнання. Обслуговування за умовами базується не тільки на нормах, відображених у технічній документації, але й на поточному технічному стані конкретного виробу та результатах його технічної діагностики. Такий підхід підвищує ефективність планування ресурсів на підприємстві.

Технологія цифрового двійника сприяє впровадженню технічного обслуговування за станом, оскільки дає можливість аналізувати фактичний технічний стан досліджуваного енергетичного обладнання та давати відповідні рекомендації за результатами прогнозного аналізу. Водночас завдяки застосуванню різних технологій, які знаходять неявні зв'язки між даними з різних джерел, підвищується точність визначення фактичного стану [36]. У роботі [37] представлено реалізацію сучасного техобслуговування вітрових турбін на основі технології цифрових двійників. У [38] автори представляють застосування цифрових двійників для вибору оптимальної стратегії обслуговування та ремонту силового перетворювача. Залежно від умов експлуатації конкретного виробу може бути обрана різна стратегія

технічного обслуговування та ремонту, яка здійснюється за допомогою впровадження технології digital twin.

Серед них варто відмітити зв'язок між технологією цифрових двійників і розробкою кіберфізичних роботизованих систем для завдань моніторингу та оцінки стану електрообладнання. Крім того, як показано в [39], технології цифрових двійників можуть бути використані як для формування оптимальних маршрутів для безпілотних діагностичних систем, так і для проектування об'єктів енергосистеми, які спочатку були б більш придатними для використання кіберфізичних роботизованих систем.

2.3. Переваги та недоліки застосування технології цифрових двійників в електроенергетичних системах

Цифрові двійники, що інтегрують деякі популярні технології, такі як smart датчики, зв'язок 5G, хмарні платформи та аналіз великих даних – це інтегрований багатодисциплінарний, мультифізичний, багатомасштабний і багатоймовірнісний процес моделювання. Ця система може всебічно покращити інтелектуальну роботу електромережі за допомогою цифрових двійників, які керуються потоком даних, створених інтелектуальною мережею.

7 квітня 2020 року Національна комісія з питань розвитку та реформ (NDRC) та Офіс Центральної комісії у справах кіберпростору (ОССАС) оприлюднила План впровадження щодо сприяння дії «Розвиток інтелекту за допомогою чисел у хмарі» для розвитку нової економіки, яка вперше запропонувала сім цифрових технологій нового покоління, і Digital Twin була однією з них.

Електроенергетика є важливою базовою галуззю та пов'язаною з іншими галузями економіки країн. Безпека, стабільність і достатнє електропостачання є важливою запорукою всебічного, злагодженого та сталого розвитку економіки. В даний час застосування Digital Twin в аерокосмічній промисловості, машинобудуванні, та нафтовій і газовій промисловостях є відносно розвиненими. Проте дослідження та застосування

в енергетиці все ще тривають у зародковому стані, а це означає, що існує великий потенціал для розвитку та широких інновацій для Digital Twin. Таким чином, дослідження щодо застосування цифрових двійників можуть мати великий потенціал для подальшого їх застосування в електроенергетиці.

В епоху Інтернету цифровізація та інтелект енергетичної системи, електромережі та енергетичного обладнання є важливими гарантіями здорового розвитку національної економіки та нормального життя людей. Застосування цифрових подвійних технологій в електроенергетиці в основному включає динамічний моніторинг та технічне обслуговування обладнання для виробництва електроенергії та лічильників керування потужністю в режимі реального часу, а також, оперативне керування електромережею. Зокрема, він включає наступні аспекти:

- 1) Щоб подолати механізм безпечної та стабільної роботи та технологію аналізу характеристик системи живлення;
- 2) Створити нове покоління симуляційних платформ;
- 3) Підвищити ефективність і точність розрахунків;
- 4) Прорвати діагностику несправностей, відновлення та автоматичну реконструкцію та інші технології;
- 5) Для комплексного підвищення обороноздатності енергосистеми при каскадних збоях, екстремальні погодні умови або зовнішні пошкодження тощо.

Цифровий двійник та його значення, що інтегрує деякі популярні технології, такі як розумні датчики, зв'язок 5G, хмара платформи, аналіз великих даних і штучний інтелект, є інтегрований багатопрофільний, багатофункціональний, багатомасштабний і багатоймовірнісний процес моделювання з метою розробки віртуальної моделі в цифровому просторі та встановлення відношення відображення між цифровою віртуальною та фізичною сутністю шляхом повного використання та використання переваг великої кількості ресурсів даних для «дзеркальних» об'єктів [59-60]. Цифрові

двійники широко використовуються в аерокосмічній, медичній, нафтогазовій, електроенергетиці та інших галузях промисловості.

На початку розвитку в 2002 році цифрові двійники існували тільки у вигляді концепції. Пізніше цифрові двійники було вперше застосовано для підтримки здоров'я та захисту літаків у Національному управлінні з аеронавігації та дослідження космічного простору (NASA).

В останні роки тема цифрових двійників в промисловому виробництві набуває все більшої популярності. Як важлива гарантія життєдіяльності людей і національної економіки, електроенергетика потребує поглибленого застосування цифрових двійників для сприяння її подальшого розвитку. Сьогодні цифрові двійники надають розширений аналіз для своєї дзеркальної системи, поєднуючи фізичний та цифровий світи, що дозволяє відображати фізичні умови в реальному часі.

Але поряд з перевагами, можна відмітити і наступні недоліки цифрових двійників:

1. Висока трудомісткість і вартість створення програмної частини. По-перше, це розробка математичних моделей і залучення міждисциплінарної команди фахівців (інженерів, ІТ-спеціалістів, системних аналітиків, фахівців з обробки даних, фахівців з інформаційної безпеки). По-друге, це висока складність реалізації комп'ютерної моделі з достатньою точністю та високою деталізацією процесів.

2. Необхідність використання апаратних, програмно-апаратних та телекомунікаційних систем збору, передачі та зберігання великих обсягів даних із захистом від втрати та порушення цілісності даних. Для багатьох існуючих підприємств енергетики створення цифрового двійника вимагатиме дуже великих інвестицій у цифровізацію лише для реалізації збору та передачі необхідних даних у режимі реального часу або майже в режимі реального часу.

3. Кіберзагрози: цифровий двійник як інструмент підтримки прийняття рішень або автоматичного керування промисловими, енергетичними та

логістичними об'єктами вразливий для зловмисників. Вони можуть завдати критичної шкоди, спотворюючи вихідні дії цифрового центру та порушуючи технологічний процес. Наприклад, інтеграція програмного забезпечення та фізичного високовольтного обладнання електростанції та підстанції створює загрозу пошкодження електрообладнання шляхом впровадження шкідливого коду в програмну частину системи. Вихід з ладу електрообладнання може призвести до каскадного ефекту: від зупинки електростанції/підстанції до знеструмлення в межах регіону. Це, у свою чергу, може призвести до масових аварій і техногенних катастроф на транспорті, підприємствах, у системах життєзабезпечення. При цьому цифровий двійник агрегатного типу підключається відразу до багатьох фізично існуючих об'єктів, що створює ризик масової катастрофічної атаки.

Оскільки цифровий двійник є складною апаратно-програмною системою, часто розподіленою, виникає багато вразливостей. До них відносяться вразливості в каналах передачі даних, можливість підключення до елементів збору даних, уразливості бази даних і можливість проникнення в систему наглядового контролю. У разі використання машинного навчання для прийняття рішень необхідно враховувати вразливості, пов'язані з отруєнням даних, а також підміною моделей машинного навчання та загрозами, пов'язаними з ризиками непередбачуваних критичних помилок. Побудова надійного захисту та кібербезпеки цифрового двійника вимагатиме дуже великих інвестицій і постійного моніторингу для виявлення вразливостей, загроз і атак.

Економічний ефект від впровадження цифрових даних проявляється повільно, оскільки потрібне агрегування великої кількості даних. Ще однією особливістю є підвищення точності прийняття рішень, наприклад, у задачі управління життєвим циклом електромережевого обладнання. Це дає відстрочений економічний ефект, який проявляється у збільшенні життєвого циклу та зменшенні аварійності. Існує ризик не досягнути очікуваного ефекту через використання некоректних моделей, недостатньо високого

рівня спостережуваності елементів об'єкта або помилок у програмному кодї. У той же час, як показано вище, витрати на розробку, впровадження та підтримку цифрових двійників дуже високі. У результаті термін окупності надто довгий, часто довший за горизонт прийняття рішень у компанїях.

2.4. Застосування цифрових двійників та зміна методологїї проектування електроенергетичних систем

2.4.1. Система монїторингу живлення (PMS)

Розподїленї джерела енергїї мають високу енергоефективнїсть, та їх широке застосування, певною мїрою, пїдвищує ймовїрнїсть несправностї або аварїї в енергосистемї. Тому попит на систему монїторингу живлення для скорочення часу реагування на критичнї несправностї швидко зростає. Вирїшення цїєї проблеми залежить вїд подальшого розвитку технологїї монїторингу в контролї енергосистеми.

Цифровї двїйники застосовуються до системи монїторингу живлення через його керовану даними їнформацїю про ситуацїю в реальному часї та замкнутий зворотнїй зв'язок. Метод прогнозування та виявлення несправностей на основї цифрових двїйникїв дозволяє операторам передбачити можливий майбутнїй стан ї вчасно надавати рїшення до того як станеться збїй або аварїйна ситуацїя в енергосистемї, що призведе до майбутнього розвитку технологїї контролю енергосистеми (ТКЕС).

У [61] Brosinsky та їн. запропонував концепцїю цифрового двїйника для контролю енергосистеми у 2018 роцї, як показано на рис. 2.2. Ідея дизайну походить вїд динамїчного цифрового вїддзеркалення. Як частина системи монїторингу живлення, динамїчного цифрового вїддзеркалення є динамїчною моделлю, яка вїдображає стан системи в реальному часї. Данї датчика вїддаленого кїнцевого блоку ї блоку вимїрювання фазори вводиться в базу даних цифрового двїйника, а потїм використовується для моделювання в реальному часї, швидкого аналізу системи та зворотнього зв'язку для керування в екземплярї моделювання динамїчного цифрового вїддзеркалення. У процесї моделювання перехресна перевїрка

використовується для забезпечення правильного розподілу відповідних активів і даних датчиків.

На основі алгоритмів самонавчання та машинного навчання в поєднанні з оперативними даними в режимі реального часу, що надходять до цифрового двійника з енергосистеми, дані цифрового двійника постійно збагачуються, завдяки чому опис стану системи може бути більш точним, а точність передбачення або моніторингу також можна покращити. Хоча, прикладів застосування цифрових двійників у центрі моніторингу небагато, можливості і переваги їх у майбутньому є очевидними.

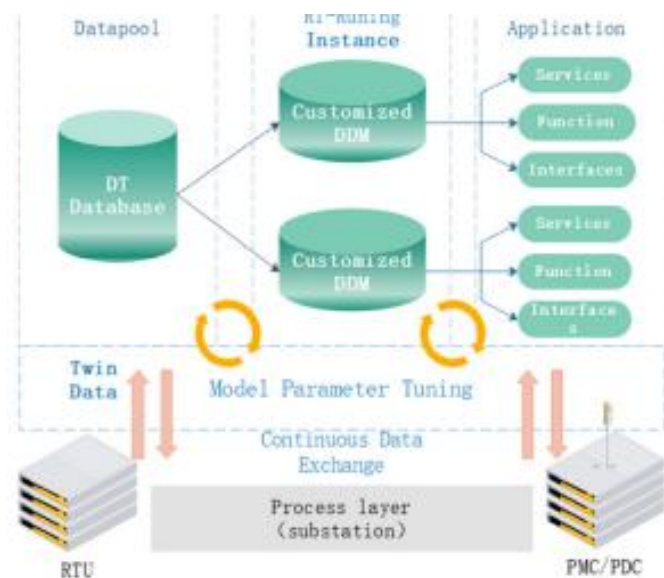


Рис. 2.2.

2.4.2. Керування кутом нахилу вітрової турбіни зі змінною швидкістю (VSWT)

Кут нахилу вітрової турбіни зі змінною швидкістю має вищу ефективність та кращу якість виробництва електроенергії, тому дослідження цього питання є дуже важливим. Як правило, кут нахилу вітрової турбіни зі змінною швидкістю має дві контрольні зони, які розташовані нижче номінальної швидкості і вище номінальної швидкості, а також контроль максимальної потужності при високій швидкості вітру завжди був складним [62-63]. Запропоновано просту стратегію керування потужністю, придатну для кута нахилу вітрової турбіни зі змінною швидкістю, яка охоплює весь діапазон швидкості вітру. [64-67] Запропоновано пропорційно-інтегральний

(PI), нечіткий (FIS), нейромережевий (NN) та інші регулятори для підвищення надійності системи щодо зміни параметрів і оптимізації продуктивності керування відповідно до динамічної та статичної швидкості. [68] Розроблено новий надійний адаптивний контролер із повним зворотним зв'язком за станом.

У [69-70] Ahmad et al. запропонував новий адаптивний контролер на основі цифрового двійника у 2020 році, в якому цифровий двійник представлення контролера визначається як імовірнісна модель реального часу, реалізована на процесорі цифрової обробки сигналів (DSP) обчислювального пристрою. Як показано на рис. 2.3, метою використання цифрового двійника є досягнення аналогічної вихідної поведінки в системах SIL (software-in-loop) і HIL (hardware-in-loop). Для досягнення виходу цифрової подвійної системи з аналогічною дією, параметри контролера оптимізовані використанням нелінійного інтегрального зворотного ходу (NIB) на основі алгоритму DDPG і безмодельне керування (MFC) (DDPG-NIB-MFC), щоб зменшити різницю між входом та виходом в HIL, і використовувати вихід кута нахилу HIL як еталонний вхід у програмне забезпечення в циклі. Результати моделювання та впровадження довели, що новий контролер є більш ефективним, надійним та більш адаптивним, ніж PI-контролер, оптимізований PSO в умовах невизначеності.

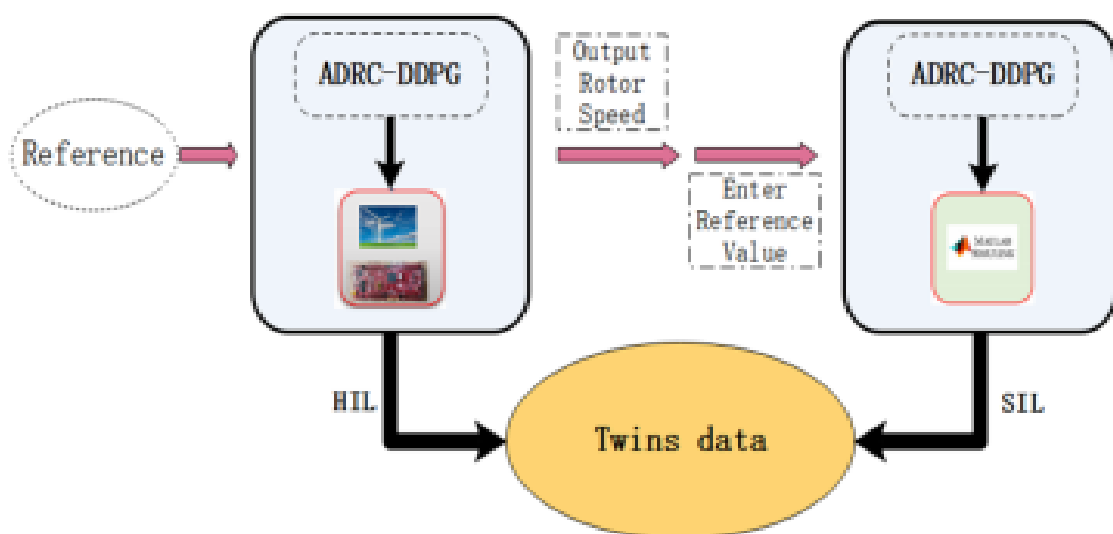


Рис. 2.3

2.4.3. Нова п'ятивимірною модель цифрового двійника і прогнозування та керування залишковим ресурсом (PHM)

Дослідницька група цифрових двійників на чолі з професором Фей Тао з BUAA пояснила нову п'ятивимірну DT модель і впровадила її в PHM. На основі цього запропоновано метод ПГМ на основі цифрових двійників [71-73].

Як показано на рис. 2.4, ця нова динамічна багатовимірною і багатопросторова-часова модель не лише створює традиційну геометричну та фізичну розмірною модель фізичної сутності, але відображає багатовимірною динаміку її геометрії, фізики, поведінки, правил і обмежень, щоб змодельований, прогнозований, оцінений та оптимізований результат могли бути більш точним.

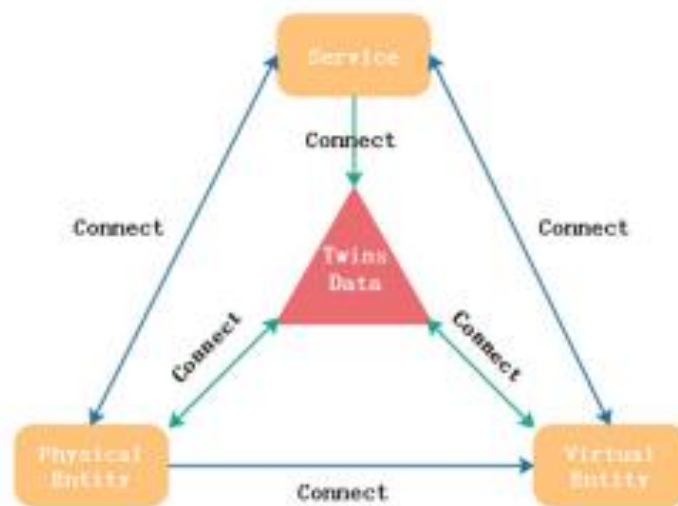


Рис.2.4.

Система керування електричною установкою на основі п'ятивимірною цифрового двійника Beijing ВКС Technology Co., Ltd. розробила інтелектуальну систему управління та контролю електростанції на основі п'ятивимірною цифрового двійника. Як показано на рис. 2.5, він реалізував такі прикладні послуги, як візуалізований інтелектуальний моніторинг у режимі реального часу, системи валів паротурбогенераторної установки, візуалізована онлайн діагностика великого ротатора, візуальне керування мережею підземних труб та візуалізована 3D система керування операціями.

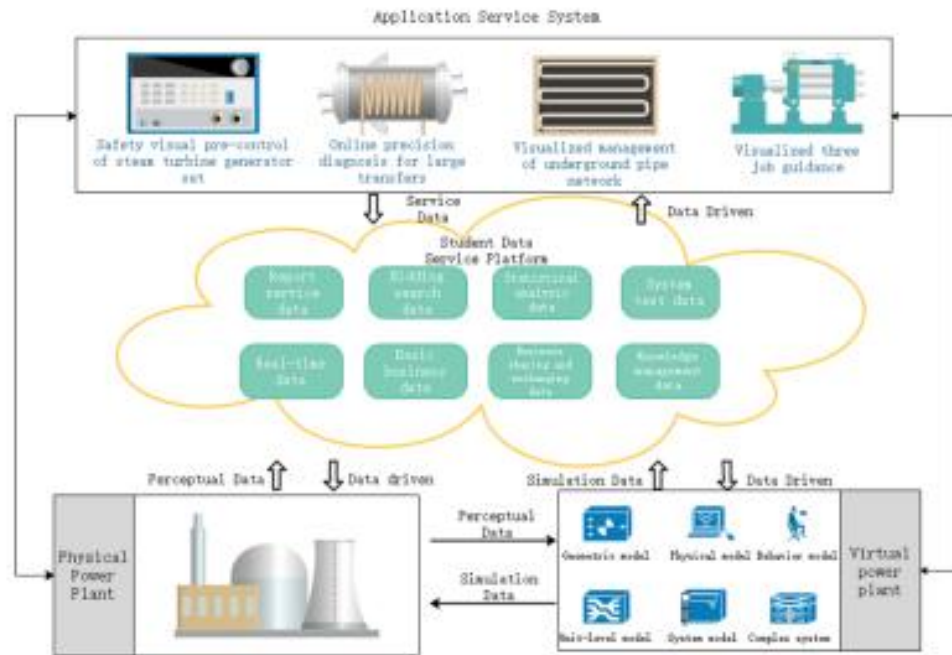


Рис. 2.5.

На основі зібраних даних у реальному часі, історичних даних і експертного досвіду система створює віртуальну 3D модель вала парової турбіни з високою точністю у віртуальному просторі для спостереження внутрішнього робочого стану парової турбіни. Система може оцінити стан парової турбіни у режимі реального часу, щоб точно попереджати та запобігати аваріям, таким як перевищення швидкості турбіни, поломка вала турбіни, постійний вигін великого підшипника, горіння втулки, нестабільність масляної плівки тощо.

У той же час це може допомогти оптимізувати конструкцію підшипника, послідовність роботи клапана та параметри відкриття. Ці переваги можуть значно підвищити надійність роботи парової турбогенераторної установки. Концепцію 5D-цифрового двійника показано на рис. 2.5.

За допомогою віртуальної моделі та результатів аналізу даних двійників система може віддалено відображати стан обладнання та компонентів, серйозність проблеми, опис несправності, метод обробки тощо, в реальному часі. Таким чином може бути реалізована дистанційна та онлайн діагностика обладнання. Оператори, відповідальні за технічне обслуговування, можуть отримати доступ до електронної пошти, сторінок і динамічних веб-сайтів,

надісланих сигналом онлайн-системи, і одночасно вони також можуть переглядати деталі стану ротатора через віртуальну модель, що працює в режимі онлайн.

Це необхідно для отримання повної та точної 3D-моделі підземної трубопровідної мережі за допомогою технологій лазерного сканування в поєднанні з площиною проекції.

На основі даних у реальному часі, історичних даних, знань предметної області та технологій 3D-лазерного сканування, повна і точна 3D модель обладнання має такі функції. По-перше, модель може бути пов'язана з навчальними курсами, щоб сформувати яскраві навчальні матеріали, які можуть допомогти новим співробітникам швидко освоїти структуру обладнання. По-друге, це може бути пов'язано з інструкцією з технічного обслуговування, щоб сформувати 3D інструкцію з експлуатації для стандартизації роботи співробітників. Зрештою, його також можна використовувати як інструмент для навчання та оцінювання співробітників.

Загалом реалізується інтелектуальна система управління та контролю електростанції на основі 5D DT перспективний моніторинг важливого обладнання, точна та дистанційна діагностика несправності, візуалізація управління та точного моделювання операцій співробітників тощо, що може задовольнити різноманітні вимоги, такі як моніторинг стану обладнання, дистанційна діагностика, експлуатація та технічне обслуговування тощо та реалізувати інтуїтивно зрозумілу візуальну взаємодію між користувачами.

На основі моделі 5D цифрового двійника обговорюється РНМ вітрової турбіни (WT). Як показано на рис.2.6, функції можуть бути упаковані в сервіси та надані користувачам у формі прикладного програмного забезпечення.

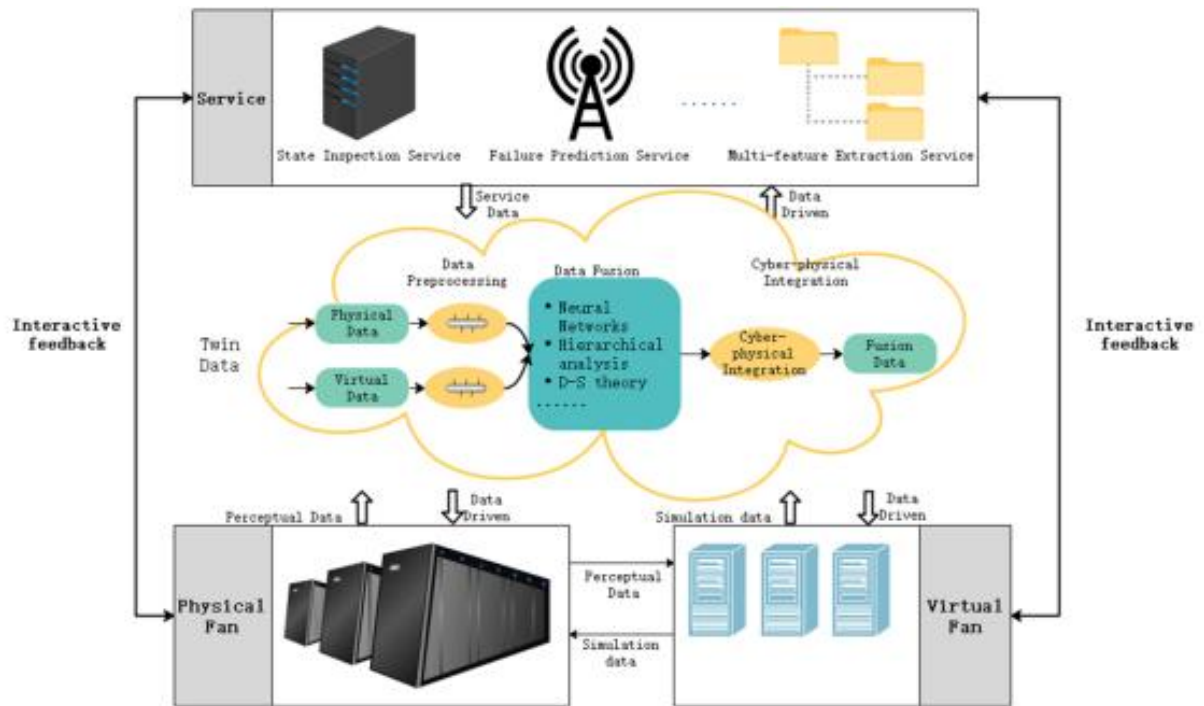


Рис. 2.6.

- Датчики розгорнуті на редукторі, двигуні, шпинделі, підшипнику та інших життєво важливих частинах фізичної вітрової турбіни для збору даних та моніторингу у реальному часі.

- На основі зібраних даних у реальному часі, історичних даних і знань предметної області можна побудувати багатовимірну віртуальну модель геометрії-фізики-правила поведінки для віртуального WT для досягнення більш реалістичного віртуального відображення фізичного WT.

- Завдяки синхронній роботі та взаємодії фізичного і віртуального WT, можна реалізувати орієнтоване на перше виявлення стану, прогнозування несправностей і розробку стратегії обслуговування через взаємодію та порівняння між фізичним станом і станом моделювання, аналіз синтезу між ними фізичні дані та дані моделювання, а також перевірка віртуальної моделі.

2.4.4. Онлайн аналіз електромережі

Онлайн аналіз динамічної оцінки безпеки (DSA) широко використовується в центрах диспетчеризації електроенергії. Коли центр диспетчерського управління обробляє великомасштабні моделі

електромережі, він виконує регулярний онлайн-аналіз DSA з 15-хвилинними інтервалами [74]. Враховуючи складність несправностей та їх усунення в електромережі та величезний вплив на звичайне життя людей, стає все більш важливим скорочення часу реагування на весь онлайн-аналіз, систему для кращого моніторингу та раннього попередження про несправності в електромережі. В [75-77] обговорено методи онлайн-аналізу, засновані на обчисленнях у пам'яті та подвійних мережевих мереж, які підходять для другого рівня архітектури онлайн-аналізу системи.

У 2019 році дослідницька група представила структуру цифрового двійника у прикладному середовищі онлайн-аналізу мережі (як показано на рис. 2.7), яка включала метод онлайн-аналізу Digital Twin (OADT) і високорівнева архітектура рішення майбутнього онлайн-аналізу в реальному часі система для підтримки реалізації нової архітектури грид-рішення онлайн-аналізу [78-79].

OADT мав деякі видатні вбудовані функції, включаючи обчислення в пам'яті, високопродуктивні паралельні обчислення, обробку складних подій і машинне навчання на основі оцінки безпеки. Як показано на рис.6, після передачі онлайн-інформації про вимірювання від RTU до шини даних диспетчерського лічильника, модель мережевого аналізу (NAM), розміщена в сітці даних постійно оновлюється сама із затримкою менше секунди, щоб відстежувати робочий стан дзеркальної сітки. Якщо виявляється критична ситуація, механізм обробки складних подій використовується для аналізу ситуаційної обізнаності та моментального знімка потоку навантаження із затримкою другого рівня, пов'язаної з онлайн-вимірюванням. Інформація буде створена для управління подальшими додатками онлайн-аналізу, такими як модель NN.

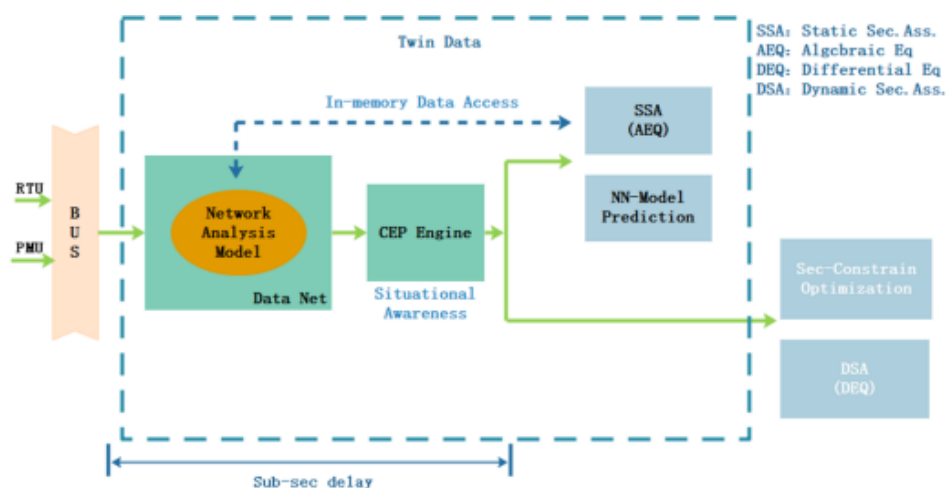


Рис.2.7.

2.4.5. Нова методологія проектування енергосистеми на основі цифрового двійника

З наведених вище застосувань цифрових двійників в електроенергетиці видно, що на відміну від традиційної системи живлення, керованою моделлю та експертною системою, енергетична система, заснована на цифрових двійниках, має ядро. Залежність від фізичних систем невелика, але в основному покладається на масивне, глибоке навчання, багатовимірний статистичний аналіз, потокові обчислення, граф знань та інші алгоритми або інструменти штучного інтелекту, що відповідають масивним даним.

Схема проектування енергосистеми на основі ДТ показана на рис.2.8.

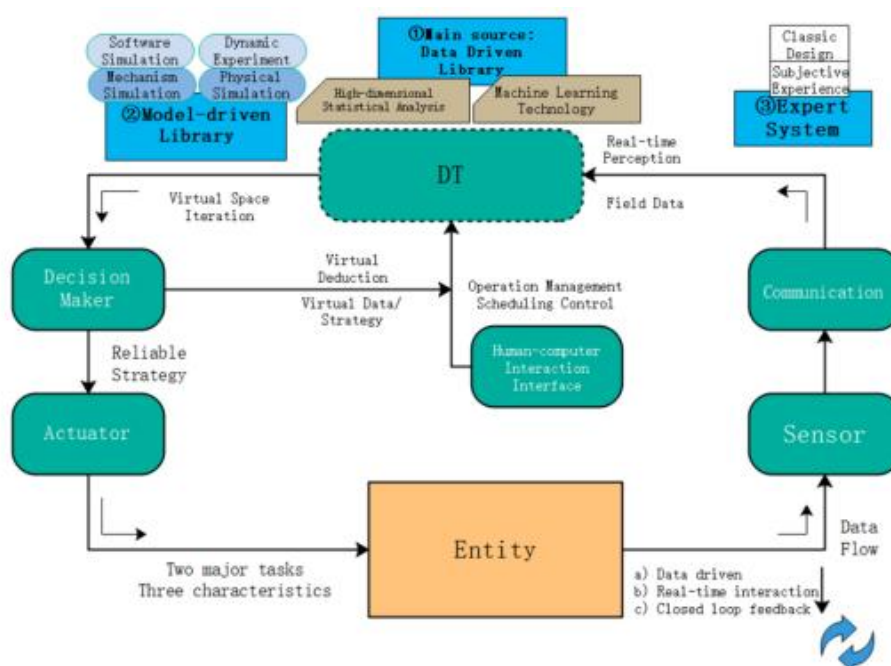


Рис.2.8.

Система живлення на основі цифрового двійника може забезпечити узгодженість віртуальної та реальної системи точніше та швидше шляхом порівняння з реальним значенням під час виконання. Трьома основними характеристиками системи є керування даними, замкнутий зворотний зв'язок і взаємодія в реальному часі.

- Керовані даними переваги від масивних даних електромережі та поступового вдосконалення система інтелектуального аналізу великих даних, яка робить технологію PSDT більш придатною для комплексної енергетики.

- Зворотний зв'язок із замкнутим контуром дозволяє адаптивно оновлювати та оптимізувати модель даних системи шляхом активного вивчення великої кількості даних після того, як вона введена в експлуатацію, і ефект навчання може постійно вдосконалюватися зі збільшенням обсягу даних.

- Інтерактивні зв'язки в режимі реального часу, керовані даними та замкнутий зворотний зв'язок, ще більше покращують функцію ситуаційної обізнаності в реальному часі та віртуальний тестування PSDT у супер-реальному часі, так що PSDT міг точно контролювати ситуацію в системі та швидко імітувати оптимізовані рішення не тільки в планових операціях, але і в екстрених ситуаціях.

2.5. Тенденції розвитку та шляхи подальшого впровадження цифрових двійників

Розгортання додатків цифрового двійника в енергетичній галузі в основному залежить від реалізації таких послуг, як Cyber-Physical System (CPS), багатовимірні віртуальні моделі, подвійне керуване даними та динамічне інтерактивне з'єднання в реальному часі, а основні технології відображені в цифрових двійниках моделювання, CPS, метод взаємодії між віртуальною моделлю та об'єктом реального світу тощо.

Згідно з наведеним вище поглибленим аналізом потужності додатків цифрових двійників, майбутні тенденції розвитку та шлях впровадження потужності цифрових двійників аналізуються наступним чином.

Проведено попередні дослідження та застосування методів і процесів ДТ моделювання в електроенергетиці. У деяких аспектах, таких як дослідження фізичної поведінки, неруйнівна технологія вимірювання матеріалу, похибка кількісного визначення та оцінка достовірності похибок теоретичні дослідження зробили певний прогрес. Ці допоміжні технології допоможуть визначитися потужності параметрів моделі ДТ, побудови обмежень поведінки та перевірки точності моделі. У майбутньому потрібно буде відштовхуватися від теоретичних досліджень узгодженості основи моделі та модельного процесу та забезпечують теоретичні гарантії та практичної точності моделі.

На даний момент дослідження теорії та технології CPS все ще знаходяться на початковій стадії, і CPS енергетичної промисловості зосереджується на інтеграції та злитті даних датчиків, і зібраних системних даних, а також на зменшенні розмірів, обробка злиття даних. Надалі, виходячи з потреб віртуально-реальної взаємодії в силі цифрового двійника, з чотирьох точок зору фізичної інтеграції, інтеграції моделі, інтеграції даних та інтеграції послуг для отримання наукової інформації CPS і розробка відповідної еталонної основи для системи впровадження, яке може забезпечити теоретичну та технічну довідку для практики цифрових двійників в електроенергетиці.

Динамічне інтерактивне з'єднання в режимі реального часу з'єднує фізичні об'єкти, віртуальні моделі та сервісні системи в органічне ціле, що дозволяє обмінюватися інформацією та даними між різними частинами. Тому його можна розглядати як «контейнер» додатків цифрових двійників. Отже, без взаємодії компонентів програми DIGITAL TWIN втрачають життєву силу, як людина, що перерізає собі артерію. DIGITAL TWIN з енергетичної промисловості спочатку реалізував взаємодію між фізичним світом і віртуальним, але дослідження взаємодії між обладнанням і послугами будуть критично важливою технічною гарантією та тенденцією майбутнього

розвитку технологій для успішного застосування цифрових двійників в електроенергетиці, яка поки що має незначний прогрес.

2.6. Порівняльний аналіз програмного забезпечення для цифрових двійників

На ринку вже доступно багато різнопланового програмного забезпечення для створення та експлуатації цифрових двійників у сфері електроенергетики.

ETAP Digital Twin

Однією з відомих систем для моделювання та оптимізації систем електропостачання є ETAP (Electric Transient Analysis Program). Розглянемо ETAP та порівняємо його з аналогами.

Тип: ETAP є програмним забезпеченням для аналізу та проектування електричних систем.

Використання: Використовується для моделювання, аналізу та оптимізації різних аспектів електроенергетичних систем, таких як стабільність, короткі замикання та інші.

ETAP Electrical Digital Twin – це уніфікована інженерна платформа реального часу для прискорення продуктивності, підвищення ефективності та забезпечення оцифровки енергосистем на кожному етапі життєвого циклу електроустановки, починаючи від проектування та виготовлення, експлуатації та обслуговування. Вона представляє віртуальні моделі реальної енергосистеми в різних фізичних і експлуатаційних умовах.

ETAP пропонує інтегровану платформу Electrical Digital Twin, збагачену інтелектуальними рішеннями. ETAP Electrical Digital Twin побудовано на багатовимірній основі, що забезпечує ефективне проектування, аналіз, управління, експлуатацію та повну цифрову трансформацію проектів, адаптуючись до мінливих системних змін.

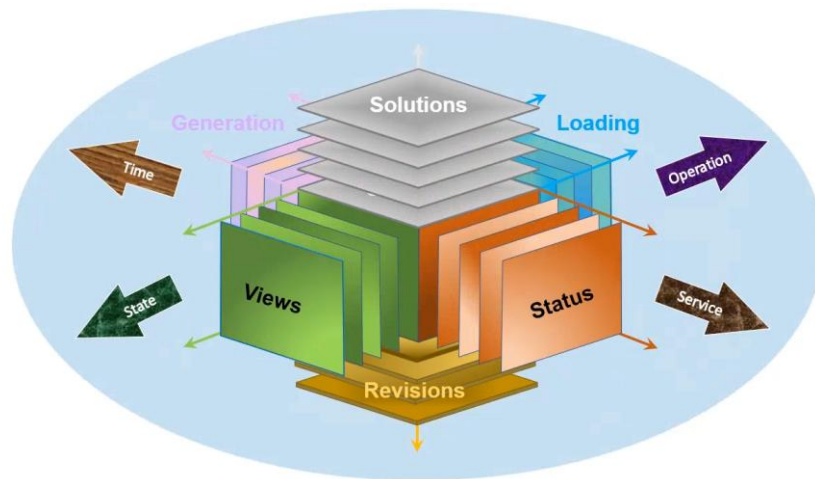


Рис 2.9

ETAP (Electrical Transient and Analysis Program) – це програмне забезпечення, призначене для аналізу, проектування та управління електроенергетичними системами. ETAP використовується інженерами та проектувальниками в галузі електроенергетики для моделювання та оптимізації роботи різних аспектів електричних мереж. Основні характеристики ETAP включають:

- Моделювання електричних систем: ETAP дозволяє інженерам створювати детальні моделі електричних систем, включаючи генератори, трансформатори, лінії передачі, розподільчі мережі та інші елементи.
- Аналіз стабільності: Програма дозволяє виконувати аналіз стабільності електроенергетичних систем, враховуючи різні фактори, такі як короткі замикання та відновлення після відключень.
- Оптимізація енергосистем: ETAP допомагає визначити оптимальні режими роботи системи, що дозволяє економити енергію та підвищувати її ефективність.
- Аналіз коротких замикань: Програма проводить аналіз коротких замикань для визначення впливу цих подій на електричні мережі та обладнання.
- Симуляція та оптимізація роботи систем: ETAP дозволяє виконувати симуляції роботи систем в реальному часі та оптимізувати їх для досягнення кращої ефективності.

- Управління проектами: Програмне забезпечення допомагає в організації та управлінні проектами, пов'язаними з дизайном та аналізом електроенергетичних систем.

ETAP є широко використовуваним інструментом в галузі електроенергетики, і воно використовується для вирішення завдань різної складності в областях від промисловості до енергетичних компаній та консультування.

Використання потужності ETAP Digital Twin протягом усього процесу цифрової трансформації допомагає інженерам, операторам і менеджерам підвищити рівень обізнаності та розуміння систем у економічно ефективному та повторюваному середовищі, пропонуючи:

- підтримку ранніх рішень;
- підвищення продуктивності;
- скорочення часу проектування;
- підвищення безпеки;
- моніторинг і оптимізація продуктивності активів;
- зниження вартість операцій;
- визначення недовикористаних системних ресурсів;
- визначення проблем в роботі;
- усунення ненавмисних відключень, спричинених людською помилкою;
- прискорити навчання інженерів і операторів;
- віртуальну перевірку дій оператора;
- перевірку налаштування системи.

Підключаючи платформу ETAP Electrical Digital Twin до більшої екосистеми безкоштовних і спільних рішень, компанія надає своїм клієнтам трансформаційну роль у проектуванні, експлуатації та підключенні в мультидисциплінарному масштабі.

Платформа, керована моделлю ETAP Digital Twin служить активним планом електричної системи, побудованої на безперервній інтелектуальній платформі від оригінальної концепції до специфікацій, проектування, інтеграції, тестування, введення в експлуатацію та підтримки в процесі експлуатації. Єдина платформа з інтегрованими додатками

- Розширена аналітика енергосистеми
- Розробка та операційна інформація
- Вивчення альтернативних дій - аналіз "Що, якщо".
- Тренажер для постійного навчання та навчання операторів
- Виявлення першопричини операційних проблем

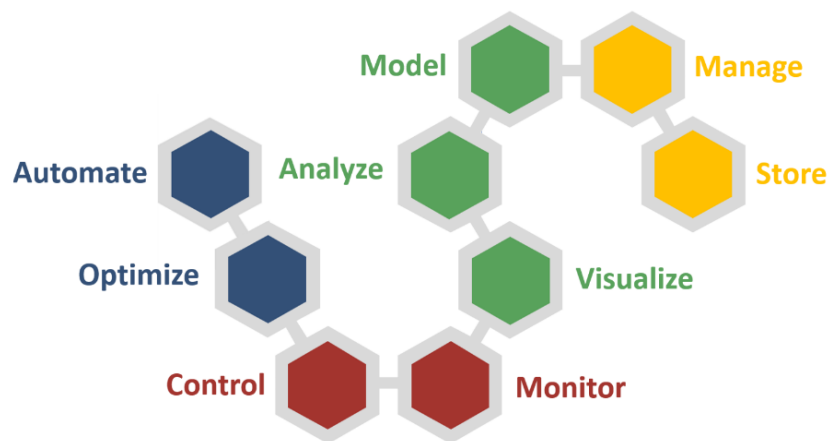


Рис. 2.10

ETAP:

Розробник: Operation Technology, Inc. (ETAP Inc.).

Функціонал:

- Включає аналіз короткого замикання, стабільності, гармонік, релейного захисту, динаміки системи і багато іншого.
- Можливості інтеграції з реальними даними з обладнання та інших джерел.
- Система введення та редагування даних через інтуїтивний інтерфейс.

Розгортання та використання:

- Використовується великими енергетичними компаніями для проектування, тестування та оптимізації складних систем електропостачання.

Інтеграція та зручність:

- Широкі можливості інтеграції, пристосований для великих проєктів.
- Актуальність використання технології цифрових двійників в енергетиці підтверджена проєктами багатьох великих промислово-технологічних корпорацій.

Siemens Digital Twin

Тип: Siemens Digital Twin — це концепція, що стосується віртуальної моделі продукту чи системи.

Використання: В Siemens Digital Twin створюють віртуальну модель для імітації та аналізу реальних систем. Використовується в різних галузях, включаючи виробництво, транспорт, енергетику та інші.

Компанія Siemens використовує свою власну платформу для створення та експлуатації цифрових двійників в електроенергетиці. Ця платформа відома як Siemens Digital Twin. Siemens активно впроваджує цифрові технології, такі як Інтернет речей (IoT) та цифрові двійники, в енергетичні системи для оптимізації процесів, моніторингу та підвищення ефективності електропостачання. Основні характеристики Siemens Digital Twin включають:

- **Віртуальні моделі:** Siemens Digital Twin дозволяє створювати точні віртуальні моделі фізичних об'єктів або систем, які відображають їх стан та характеристики в реальному часі.
- **Синхронізація з реальним світом:** Віртуальні моделі у Siemens Digital Twin постійно оновлюються в реальному часі за даними, отриманими з фізичних об'єктів, що дозволяє точно відтворювати їх стан.
- **Моніторинг та аналіз:** Концепція передбачає можливість моніторингу та аналізу функціонування об'єктів в реальному часі, що дозволяє виявляти аномалії та оптимізувати роботу систем.
- **Оптимізація процесів:** Siemens Digital Twin використовується для оптимізації процесів та виробничих ліній, сприяючи підвищенню ефективності та зниженню витрат.

- **Управління життєвим циклом об'єкта:** Концепція охоплює управління життєвим циклом об'єкта від проектування та виробництва до експлуатації та обслуговування.

- **Інтеграція з іншими технологіями:** Siemens Digital Twin може інтегруватися з різними технологіями та іншими системами для забезпечення повноцінного управління об'єктом.

Ця концепція використовується в різних галузях, включаючи виробництво, енергетику, транспорт та інші. Важливо враховувати, що з часом можливі зміни та оновлення в самому підході Siemens до Digital Twin.

Digital Twin від Siemens може використовуватися для моделювання, аналізу та оптимізації різних аспектів електроенергетичних систем, включаючи генерацію, передачу та розподіл електроенергії. Він дозволяє будувати цифрові моделі електроенергетичного обладнання та мереж для подальшого використання в аналізі та прийнятті управлінських рішень.

Загальні характеристики та функціонал програми Siemens Digital Twin притаманні цифровим двійникам в контексті електроенергетики:

1. **Моделювання обладнання:** Системи цифрових двійників дозволяють моделювати електричне обладнання та створювати віртуальні представлення реальних компонентів електроенергетичних систем.

2. **Моніторинг та Діагностика:** Siemens Digital Twin зазвичай надає можливості моніторингу в реальному часі та діагностики стану обладнання. Це включає виявлення аномалій, прогнозування потенційних проблем та оптимізацію виробничих процесів.

3. **Інтеграція з IoT:** Використання інтернету речей (IoT) для збору даних з реального світу та їх інтеграція з цифровим двійником для отримання повної та точної інформації.

4. **Оптимізація роботи систем:** Здатність використовувати цифрові моделі для аналізу та оптимізації енергетичних систем, враховуючи різні сценарії та умови експлуатації.

5. Управління аномаліями та аварійність: Можливість виявлення аномальної поведінки та управління аварійними ситуаціями для забезпечення безпеки та надійності електроенергетичних систем.

6. Візуалізація та аналіз даних: Графічне відображення стану системи, аналіз ключових показників продуктивності та надання зручного інтерфейсу для користувачів.

Комплексним рішенням, що дозволяє розробляти цифрові двійники, представленим корпорацією Siemens, є MindSphere [14]. Це рішення має функціональність для роботи з обладнанням енергосистеми, широкий спектр відкритих MindSphere API, включаючи аналітичні сервіси, і MindSphere Store з готовими до використання додатками.

Ці загальні концепції, і функціонал Siemens Digital Twin можуть змінюватися в залежності від конкретної версії та моделі продукту. Точні характеристики та функціонал Siemens Digital Twin можуть змінюватися відповідно до конкретних вимог та потреб клієнтів.

General Electric Digital Twin

Тип: General Electric (GE) також використовує концепцію цифрового двійника (Digital Twin) у своїх рішеннях.

Використання: Цифровий двійник від GE може використовуватися для моніторингу, аналізу та оптимізації роботи об'єктів, таких як турбіни, машини, електростанції тощо.

Основні характеристики General Electric Digital Twin включають:

- Створення віртуальних моделей: General Electric Digital Twin базується на створенні віртуальних моделей реальних об'єктів або систем, які відображають їх стан та характеристики.

- Моніторинг та діагностика: Можливість моніторингу реальних об'єктів в режимі реального часу, що дозволяє виявляти аномалії та забезпечувати діагностику для покращення ефективності та надійності.

- Аналіз та оптимізація процесів: Функції для аналізу та оптимізації роботи об'єктів або систем, спрямовані на підвищення продуктивності та зниження витрат.

- Управління життєвим циклом: Можливості управління повним життєвим циклом об'єктів – від проектування та виробництва до експлуатації та обслуговування.

- Інтеграція з іншими технологіями: Можливості інтеграції з різними технологіями та іншими системами для покращення управління та взаємодії.

- Орієнтованість на різні галузі: Врахування специфіки конкретних галузей, таких як енергетика, виробництво, транспорт тощо.

General Electric розробляє та впроваджує технологію цифрового двійника на основі платформи PREDIX [16]. Платформа PREDIX знайшла широке застосування при створенні цифрового двійника газових турбін. Платформа включає цифрову модель турбіни, інтелектуальну базу даних та аналітичний блок, який визначає поточний стан турбіни та прогнозує її продуктивність.

Інші приклади програмного забезпечення цифрових двійників

Щоб створити комплексне міжгалузеве рішення, АББ впровадила продукт ABB Ability [15]. У рамках ABB Ability реалізована технологія Aspect Object, що означає можливість створення цифрового двійника реального обладнання.

IBM реалізувала та впровадила систему створення цифрових двійників IBM Engineering Lifecycle Optimization [17], спрямовану на оцінку фактичного технічного стану обладнання.

Американська компанія Paladin Gateway розробила та впровадила платформу Power Analytics [18], яка складається з різноманітних сервісів з можливістю їх розміщення в хмарі, що дозволяє створювати цифрові двійники, засоби управління програмним забезпеченням та обмінюватися даними моніторингу енергосистеми.

У [25] представлено розвиток концепції цифрового двійника з використанням технології 3D моделювання для побудови Smart Grid у 23 районах Токіо (Японія). Проект «Плато» це тривимірний міський простір, який імітує міське життя та існуючі, очікувані навантаження на систему електропередач. Проект спрямований на планування розвитку та експлуатації електромереж, міське планування, запобігання стихійним лихам та покращення якості життя жителів Токіо. Головною перевагою проекту є можливість його застосування різними службами міста.

Як видно, використання цифрових двійників в енергетиці є великою темою. У цьому огляді розглядаються особливості використання цифрових двійників для управління життєвим циклом енергетичного обладнання, технології та дані, необхідні для реалізації.

Порівняльний аналіз

- Область застосування: Siemens Digital Twin та General Electric Digital Twin мають більший спектр застосувань у порівнянні з ETAP, оскільки вони можуть використовуватися в різних галузях, в той час як ETAP спрямований, переважно, на електроенергетику.

- Функціональність: ETAP спеціалізується на електроенергетичних системах та має розширені можливості для аналізу електричних мереж. Siemens та GE Digital Twin ставлять свої концепції в контексті створення віртуальних моделей для аналізу та управління реальними системами.

- Інтеграція: Siemens Digital Twin та General Electric Digital Twin, ймовірно, мають можливості ширшої інтеграції з іншими технологіями та системами порівняно з ETAP, оскільки ETAP більше орієнтований на електроенергетику.

Порівняння цифрових двійників:

Таблиця 2

<i>Компанії та їх програмне забезпечення</i>	<i>Функціонал</i>	<i>Застосування</i>	<i>Інтеграція</i>
ETAP Electrical Digital Twin	спеціалізується на аналізі та проектуванні електроенергетичних систем	Використовується для моделювання, аналізу та оптимізації стабільності та ефективності електроенергетичних мереж.	більше орієнтований на електроенергетику
Siemens Digital Twin	охоплює створення віртуальних моделей фізичних об'єктів для імітації та аналізу в реальному часі	Використовується в різних галузях, включаючи виробництво, енергетику, транспорт і багато інших, для оптимізації процесів та управління активами	мають можливість ширшої інтеграції з іншими технологіями та системами
General Electric Digital Twin	є концепцією віртуальних моделей для аналізу та оптимізації роботи фізичних систем.	Використовується в галузях енергетики, промисловості та інших для моніторингу, управління та оптимізації функціонування об'єктів	мають можливість ширшої інтеграції з іншими технологіями та системами

Висновки до розділу 2

Цифрові двійники є ключовою частиною процесу цифрової трансформації. Вони створюють точну віртуальну копію фізичних об'єктів, активів і систем для підвищення продуктивності, оптимізації операцій і збільшення прибутку.

Технології Smart Signal і Asset Performance Management (APM) створюють цифрові двійники на основі операційних даних компонентів (насосів або компресорів), критичних активів (турбін) або систем активів (цілі електростанції).

Технології ADMS, GIS і AEMS допомагають операторам електромереж створювати мережевий цифровий двійник, який забезпечує повне подання наскрізної мережі активів на основі реальних операційних даних. Він включає в себе перегляди мережі «як є», «майбутня» та в реальному часі, а також дозволяє всім відділам вносити та використовувати дані, які допомагають досягти кращих результатів.

Network Digital Twin може допомогти операторам створювати віртуальні моделі для кращої роботи, аналізу та оптимізації того, як мережа реагує на вплив дедалі більш екстремальних погодних умов, старіння інфраструктури та зростаючого використання відновлюваних джерел енергії в мережі.

Process Digital Twins створює моделі «найкращого способу» для запуску процесу в певному середовищі, який часто називають «золотою партією». Визначивши найоптимальніший процес виробництва певного продукту, оператори заводів можуть переконатися, що вони стабільно відповідають цілям якості, вартості та обсягу.

При виборі програмного забезпечення для цифрових двійників важливо враховувати потреби, розмір проекту та надійність розробника, оскільки це може вплинути на успішність інтеграції та підтримку у майбутньому. Вибір між цими програмами буде залежати від конкретних вимог конкретного проекту, розміру системи та рівня комплексності. Потребують урахування потреби в інтеграції, обсягу проекту, а також довгострокової підтримки та надійності розробника.

РОЗДІЛ 3. ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

3.1 Технології цифрових підстанцій та їх реалізація в програмному забезпеченні цифрових двійників пристроїв релейного захисту

Стандарт IEC 61850 цифрових підстанцій надає гнучку та відкриту архітектуру для пристроїв середньої та високої напруги. Часто люди вважають його Європейським стандартом, але він є світовим стандартом, загальним для IEC та ANSI. Він реалізований на Ethernet мережах, але не прив'язаний до Ethernet. Його найчастіше відносять до перспективних, так як стандарт здатний зробити зміни у технологіях зв'язку.

Ethernet надає швидкий, надійний та безпечний зв'язок. Використовуючи стандартизовану модель та мову спілкування, стандарт надає сумісність між електричними пристроями. Тепер, кінцевий користувач може вибрати обладнання від різних постачальників і знає, що обладнання працюватиме та зв'язуватиметься без необхідності створення спеціальних інтерфейсів. IEC 61850 має стандартну базу моделей та найменувань. Він має самоописуючі пристрої, віртуальне моделювання логічних пристроїв та спільну мову для конфігурування пристроїв. Різні функції моделюються із логічними вузлами. Логічний вузол містить дані певної функції. Стандарт IEC 61850 надає проектувальникам можливість додавати безліч вузлів у фізичний пристрій

Набір даних Modbus має бути точно призначений та вказувати на адресу регістру. Modbus немає стандарту найменувань, тому має бути створено словник даних кожної розробки Modbus системи. Коли два або більше постачальників займаються проектом, це може спричинити створення множинних умовних позначень та проблеми відповідності даних при широкому тестуванні та введенні в експлуатацію. Майбутні зміни та модифікації затратні та дорогі при здійсненні. Адреса регістру змінюватиметься від пристрою до пристрою, тоді як набір даних імен IEC 61850 стандартизований і незалежний від адреси регістра. Використання IEC 61850 полегшує розробку комунікаційної системи АП.

Основи стандарту IEC 61850

За допомогою стандарту інтеграція даних здійснюється вертикально та горизонтально. Дані, такі як сигнали та події, стан вимикача та записи порушень інтегруються вертикально через OPC сервер IEC 61850. Вертикальний зв'язок здійснюється за допомогою Manufacturing Messaging Specification (MMS). Блоки Управління Звітами визначають тип інформації, що відправляється від IED до клієнтів через OPC сервер. БУО викликається подією і може бути буферизований всередині IED. IED маркує події часу перед тим, як відправити на OPC сервер. Якщо розглядати можливість створення єдиного списку послідовності команд по всьому заводу, це може стати критичним. Для термінового зв'язку між електричними пристроями використовується Generic Object Oriented Substation Event messaging або GOOSE. GOOSE може передавати будь-який тип даних між IED.

GOOSE messaging – це однорангова система передачі повідомлень, а Manufacturing Messaging Specification (MMS) – на системному рівні, зв'язок клієнт-сервер. Повідомлення GOOSE безперервно передаються з певним інтервалом часу для перевірки прийому інформації. Частота передачі зменшується з кожним інтервалом до досягнення максимального періоду часу, щоб керувати смугою пропускання мережі. Повідомлення GOOSE буде продовжувати передаватися на максимальному періоді часу, доки не зміниться значення набору даних повідомлення. У цьому випадку повідомлення буде передаватися на високій частоті і поступово зменшуватиме її доти, доки не буде досягнуто максимального інтервалу часу, якщо не змінилося значення всередині набору даних.

Використання Ethernet потребує мережевого обладнання високої надійності. Загальнодоступні мережеві пристрої не витримують у жорстких умовах підстанцій. Підстанції піддаються електромагнітним перешкодам та широкому діапазону зміни температур. Стандарт IEC 61850-3 підкреслює вимоги для електромагнітних перешкод та умов навколишнього середовища. Існує кілька провідних постачальників мережевих пристроїв, які бачать цю

проблему як хорошу можливість. На сьогоднішній день доступне мережеве обладнання, яке надійно працюватиме в електрично жорстких умовах підстанцій.

Безпека є високопріоритетною для постачальників та кінцевих користувачів комп'ютерного обладнання. Повідомлення GOOSE надсилаються на 2 рівень ISO/OSI TCP/IP стека. В результаті чого, повідомлення GOOSE не можуть бути передані через роутери або фаєрволи. Хакерам поза фаєрволом буде складно, якщо не неможливо, відправити підроблене GOOSE повідомлення. NERC та CIP висувають вимоги до мережевого обладнання, що використовується у підстанціях. Ключові постачальники ІТ обладнання розробляють та будують мережеве обладнання відповідно до цих стандартів. Незважаючи на високу безпеку, яку надає GOOSE messaging, покращення заходів безпеки буде пріоритетом для обох, постачальників та кінцевих користувачів IEC 61850.

Якщо взяти два напряму підключених IED та ідентичну пару IED, що зв'язуються за допомогою GOOSE через Ethernet, яка пара IED буде зв'язуватися швидше? У більшості випадків, повідомлення GOOSE швидше, ніж на пряму підключені IED, тому що сигнал повинен пройти через вихідний контакт на реле, що відправляє, і потім знову на вхідний контакт на приймаючому реле. IEC 61850 – це найшвидший, нині доступний на ринку стандарт зв'язку для автоматизації підстанцій.

Мережевий трафік є пріоритетом, коли мають бути надіслані критичні сигнали на інші IED. Багато мережевих комутаторів мають здатність ставити високий пріоритет GOOSE повідомленням; в цьому випадку критична інформація проходить швидше за інший мережевий трафік.

З'єднання між IED автоматично управляється GOOSE. GOOSE надсилає байт якості з кожним пакетом. Якщо якість погана, програма може повідомити операторів про проблему в мережі. Кожне повідомлення GOOSE тривало повторюється до зміни значення даних. Кожне повідомлення GOOSE також має лічильник. Приймач GOOSE повідомлення може порівняти

значення лічильника з останнім, щоб побачити чи пропустив він повідомлення і далі вжити відповідних дій. Або якщо повідомлення, що повторюється, не було прийнято в певний момент часу, тоді приймачі можуть діяти. Інакше виявлено помилку з'єднання. У разі прямого підключення IED неможливо виявити битий сигнал.

Формат COMTRADE – це міжнародний формат призначений для зберігання інформації про значення і параметри електричних сигналів (типу "струм", "напруга", і "дискретні (контактні) сигнали" зчитаних з промислових) електромереж.

Зчитування електричних сигналів протягом певного проміжку часу відбувається зазвичай під час реєстрації аварійних ситуацій в електромережах.

Реєстрація проводиться спеціальними приладами – аварійними реєстраторами, після чого сигнал оцифровується реєстратором і записується в спеціальний файл, який передається з накопичувача інформації в реєстраторі на жорсткий диск комп'ютера по спеціальній локальній мережі. Встановлене на комп'ютері спеціальне програмне забезпечення використовує отримані дані для аналізу ситуації та відображення як результатів цього аналізу, так і самих отриманих даних (осцилограм, або, як прийнято їх називати – реєстрограм). При цьому дуже часто програмне забезпечення відображення на комп'ютері додатково конвертує отримані з пристрою реєстрації дані у свій власний внутрішній формат.

Оскільки внутрішні формати в яких обробляють і аналізують аварійні осцилограми програми від різних виробників сильно різняться між собою, був створений універсальний текстовий формат запису аварійної електротехнічної інформації COMTRADE, для того щоб будь-яка програма відображення та аналізу осцилограм могла користуватися даними зареєстрованими на пристрої будь-якого виробника. програмою від будь-якої сторонньої групи розробників та надавати програмам інших розробників користуватися тими даними осцилограм, які вона використовує. Для цього

було введено правило, відповідно до якого, будь-яка програма, що відображає та аналізує дані аварійних електричних сигналів - аварійних осцилограм, і використовує у своїй роботі власний формат обробки цих даних, повинна вміти конвертувати ці дані та результати своєї роботи з ними як з власного формату в формат COMTRADE, і з формату COMTRADE у свій формат, і наявність вищезазначеної можливості є одне з основних умов конкурентоспроможності і популярності програмних продуктів створених для аналізу, реєстрації, і відображення електричних сигналів у промислових електромережах.

3.2. Програмне середовище цифрового двійника пристрою релейного захисту

Корпорація Siemens розробила цифровий двійник Siprotec Digital Twin цифрового пристрою захисту Siprotec 5 [18]. Завдяки створенню цифрового двійника вдалося знизити експлуатаційні витрати комунального підприємства за рахунок значного скорочення часу аварійних простоїв енергетичного обладнання. Хмарний додаток, представлений Siemens, сприяє значному скороченню часу усунення коротких замикань (КЗ) при пошуку та виявленні аварійних ситуацій.

Нова інноваційна хмарна система Siprotec Digital Twin пропонує комплексне тестування ваших пристроїв Siprotec 5 як частини системи автоматизації енергоспоживання з високою ефективністю, продуктивністю, безпекою та доступністю 24/7 звідусіль без будь-якого обладнання

Особливості та функції:

Віртуальне тестування пристроїв захисту Siprotec 5 - Siprotec Digital Twin.

Функції

Тестування пристрою:

- Інжекція статичних струмів і напруг;
- Моделювання двійкових входів і аналогових пристроїв;
- Робота пристрою (дисплей, LED, CFC);



Рис. 3.1

Тестування захисту:

- Зі статичними входами;
- З відтворенням файлів COMTRADE;
- З секвенсорами стану;



Рис. 3.2

Тестування зв'язку:

- Взаємодія з SCADA системами;
- Протоколи підстанції Ethernet;
- Інтерфейс захисту даних;

- Інтерфейс телезахисту;
- Веб інтерфейс користувача;
- Підключення до Інтернету речей (GridEdge);

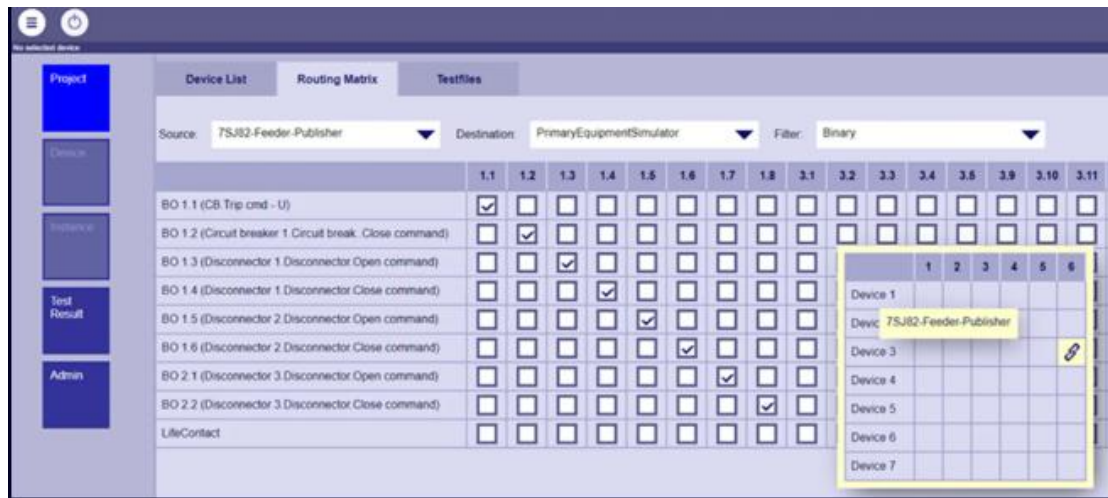


Рис. 3.3

Тестування зв'язку та кібербезпеки ЕС 61850:

- GOOSE, MMS і блокування;
- Взаємодія з SCADA системами;
- Зв'язок шини процесу;
- Журнали безпеки;
- Контроль доступу на основі ролей;

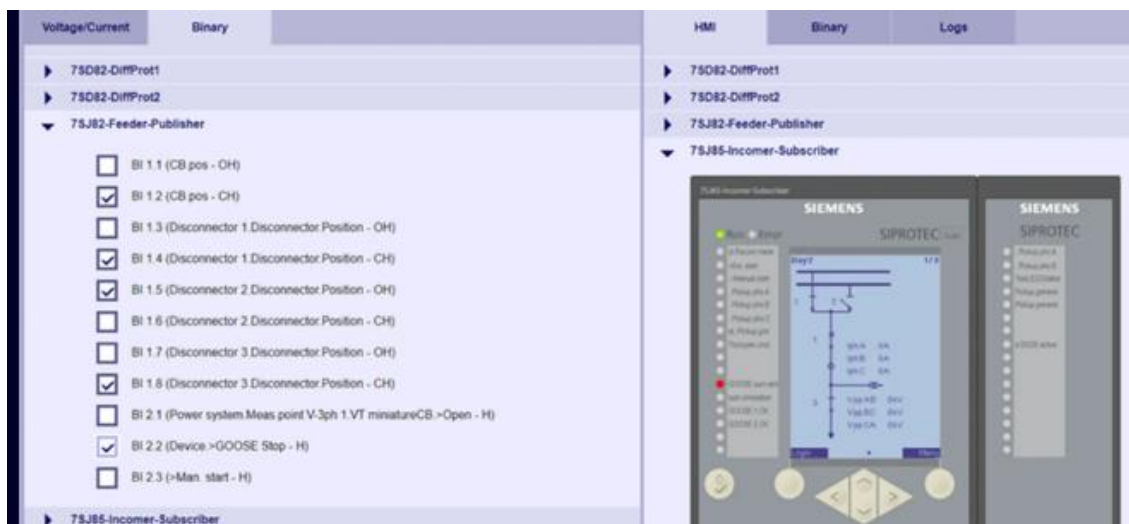


Рис. 3.4

Області застосування:

Економить час, підвищує якість протягом усього життєвого циклу вашої системи

Попередній продаж і дизайн;

Реалізація;

Введення в експлуатацію;

Операція;

Навчання;

Технічне обслуговування та послуги;



Рис. 3.4

Короткий опис функції

Візуалізація та керування переднім дисплеєм (навігація по меню, функціональні клавіші, ...)

Інжекція струмів, напруг, двійкових входів, наприклад, для охоронних поїздок;

Перевірка функцій захисту, логіки автоматизації та спеціальних програм для клієнта;

Індивідуальне та інтуїтивне навчання Siprotec 5;

Віддалені програми: повністю інтегровані програми як віддалений робочий стіл у веб-браузері: DIGSI 5, Web UI, SIPROTEC Tools тощо;

IoT-Applications SICAM GridEdge, SIPROTEC Dashboard або PQ Advisor Premium;

IEC 61850 GOOSE зв'язок між пристроями, наприклад, блокування;

Тестування інтеграції в системи автоматизації підстанцій SICAM A8000, SICAM PAS/SCC і SCADA Systems з використанням протоколів Ethernet IEC 61850, DNP3, Modbus TP, IEC 60870-5-104;

Аналіз несправностей, наприклад, відтворення записів;

Перевірка функцій кібербезпеки (Syslog, RADIUS).

Переваги:

Тестування системи енергоавтоматизації за лічені хвилини, без апаратного забезпечення та без додаткових зусиль;

Швидке підключення нових систем завдяки коротшому терміну експлуатації проекту;

Зниження OPEX із коротшими простоями для підвищення доступності завдяки кращому попередньому тестуванню (включно з виправленнями);

Зниження капітальних витрат на тестове обладнання;

Швидка та віддалена підтримка та аналіз несправностей шляхом легкого відтворення поведінки продуктів і систем;

Гнучке, постійне та персоналізоване навчання у віртуальному тестовому середовищі на основі реальних умов системи;

Siprotec Digita Twin можна легко використовувати через підписку в різних пакетах.

3.3. Тестування диференціального захисту лінії електропередачі за допомогою цифрового двійника SIPROTEC 5

У цьому розділі розглянемо приклад тестування диференціального захисту лінії електропередачі за допомогою цифрового двійника SIPROTEC (<https://www.siprotec-digitaltwin.siemens.com>).

Як видно зі схеми на рис. 3.6, у цьому прикладі ми маємо передавати на релейний пристрій по шині даних оцифровані аналогові значення струмів та напруг. Однак в цифровому двійнику ще не реалізована можливість SVM-

підписки для клієнтських пристроїв, отже ми будемо інжектувати вимірні значення струмів та напруг безпосередньо на релейні пристрої.

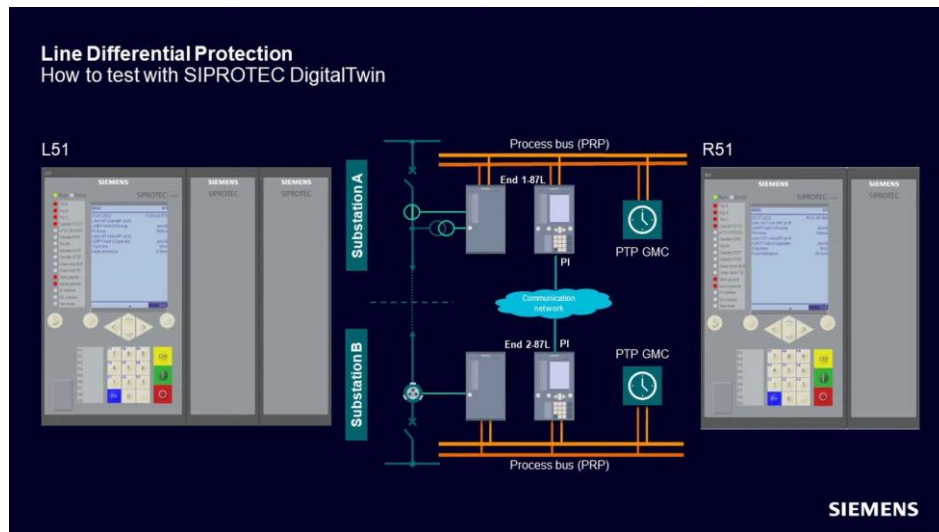
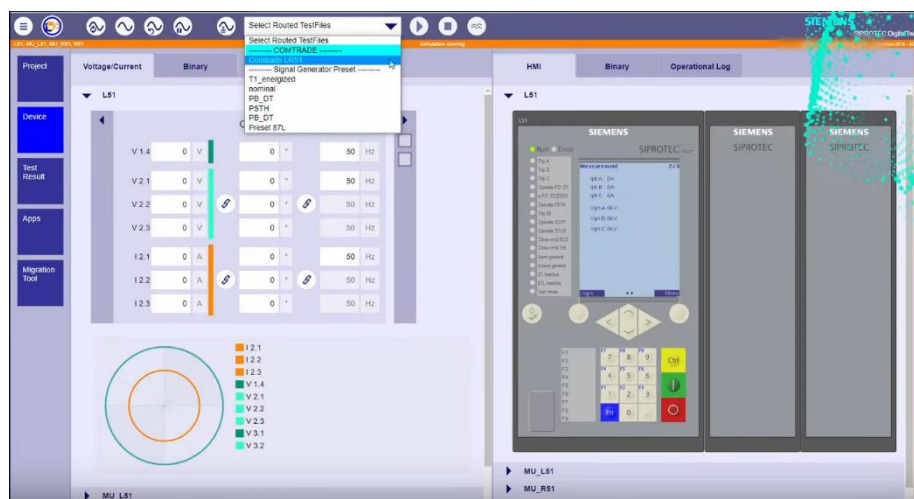


Рис. 3.6

Основне, що нам потрібно забезпечити, коли ми тестуємо диференціальний захист лінії – це те, що нам потрібно інжектувати струми та напруги з обох кінців лінії синхронно.

Найкраще це робити за допомогою інжекції даних, вимірних на обох кінцях лінії та записаних в файл осцилограм типу COMTRADE. Таким чином ми будемо використовувати один файл осцилограм, що включає в себе інжекційні дані для обох кінців лінії. Якщо у нас немає одного такого файлу, тобто, якщо ми маємо 2 окремих файли осцилограм для кожного кінця лінії, ми можемо об'єднати обидва файли в один та синхронізувати їх, використовуючи програмне забезпечення обробки осцилограм SIGRA.

Наступний крок – це завантаження об'єданого COMTRADE файлу в наш поточний проект онлайн системи цифрового двійника SIPROTEC (рис.



3.7).

Рис. 3.7

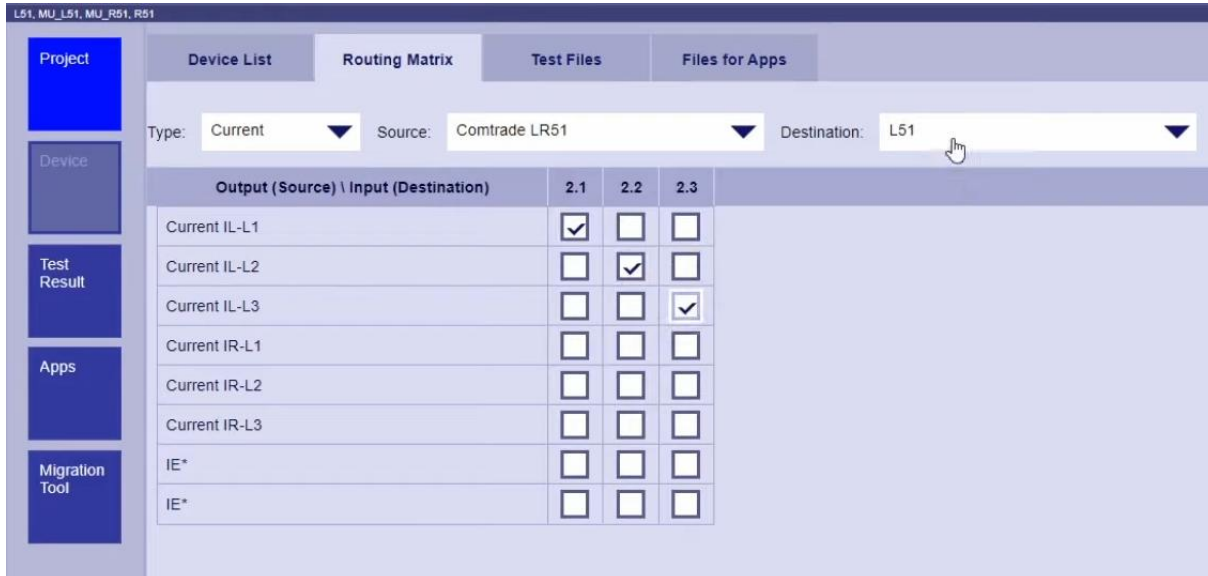
Отже, після того, як ми завантажили COMTRADE файл LR51, переходимо і прив'язуємо інформацію, яку ми маємо в файлі, до пристроїв релейного захисту в проекті (рис. 3.8). Це робиться за допомогою матриць прив'язки, за допомогою яких можна співставити певні рядки файлу осцилограм до обраних входів пристроїв релейного захисту.



Device Name	Type	Configuration Version	Device Firmware	COM Firmware	IP Address	Date Modified	TEA-X	Upload TEA-X
PrimaryEquipmentSimulator	6MD85	V08.01 (Device) V08.01 (Communication)	V08.06	V08.06	172.16.60.99/24 (Port J)	18.07.2022, 15:38:58	<input checked="" type="checkbox"/>	
6MU85_F1	6MU85	V08.83 (Device) V08.83 (Communication)	V08.84	V08.84	172.16.60.62/24 (Port J) 192.168.1.30/24 (Port F)	18.07.2022, 15:57:33	<input checked="" type="checkbox"/>	
6MU85_TXMV	6MU85	V08.83 (Device) V08.83 (Communication)	V08.84	V08.84	172.16.60.61/24 (Port J) 192.168.1.20/24 (Port F)	18.07.2022, 15:57:33	<input checked="" type="checkbox"/>	
7SX85	7SX85	V08.83 (Device) V08.83 (Communication)	V08.83	V08.84	172.16.60.60/24 (Port J) 10.16.60.60/24 (Port E) 192.168.1.10/24 (Port F)	18.07.2022, 15:57:33	<input checked="" type="checkbox"/>	
L51	7SL87	V09.20 (Device) V09.20 (Communication)	V09.20	V09.20	10.0.0.203/24 (Port J) 10.16.60.62/24 (Port E) 10.16.60.66/24 (Port M)	25.07.2022, 10:39:14	<input checked="" type="checkbox"/>	
MU_L51	6MU85	V09.20 (Device) V09.20 (Communication)	V09.20	V09.20	10.0.0.61/24 (Port J) 10.16.60.64/24 (Port F)	25.07.2022, 10:39:14	<input checked="" type="checkbox"/>	
MU_R51	6MU85	V09.20 (Device) V09.20 (Communication)	V09.20	V09.20	10.0.0.60/24 (Port J) 10.16.60.63/24 (Port F)	25.07.2022, 10:39:14	<input checked="" type="checkbox"/>	
R51	7SL87	V09.20 (Device) V09.20 (Communication)	V09.20	V09.20	10.0.0.204/24 (Port J) 10.16.60.61/24 (Port E)	25.07.2022, 10:39:14	<input checked="" type="checkbox"/>	

Рис. 3.8

Починаємо з лівого пристрою релейного захисту L51 на початку лінії. Приєднуємо до певних входів пристрою L51 значення струмів кожної з 3-х фаз на початку лінії (рис. 3.9).



Output (Source) \ Input (Destination)	2.1	2.2	2.3
Current IL-L1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Current IL-L2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Current IL-L3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Current IR-L1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Current IR-L2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Current IR-L3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IE*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IE*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Рис. 3.9

Після цього робимо те ж саме для пристрою, розташованого в правому кінці лінії R51, підключаючи до нього струми кожної з 3-х фаз, виміряні у кінці лінії (рис. 3.10).

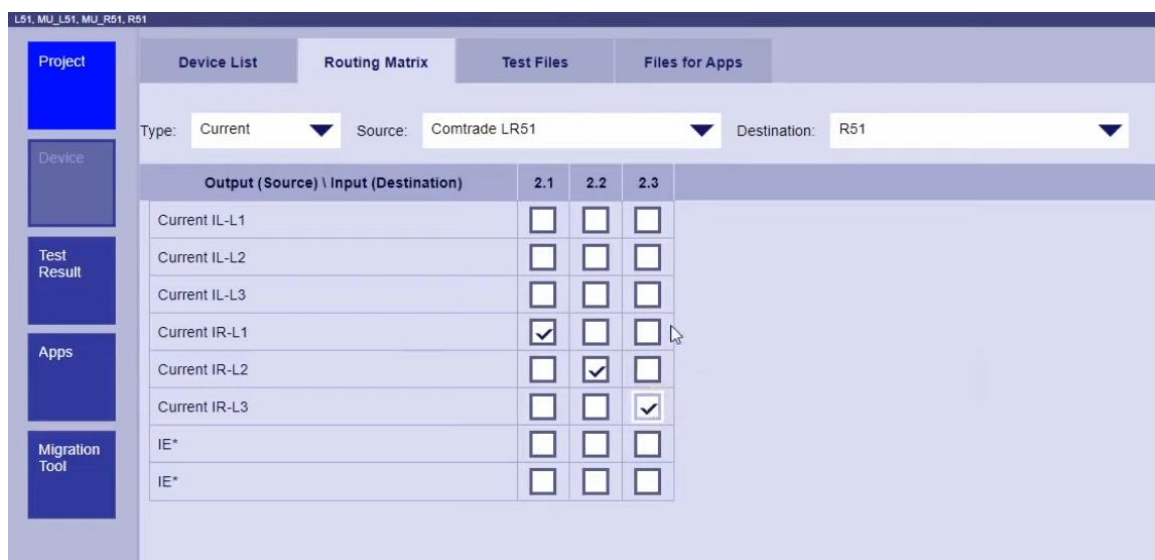


Рис 3.10

Те ж саме робимо з вимірними значеннями напруг на початку та в кінці лінії (рис. 3.11, 3.12). В програмі доступна зведена таблиця, де ми отримуємо загальний вигляд прив'язаних сигналів за допомогою матриць. Ця таблиця показує, наприклад, що напруга з COMTRADE файла LR51 була прив'язана до 5-го приладу в проекті, і якщо пересунути мишку ближче, то можна побачити назву цього пристрою, в даному випадку L51. З таблиці видно, що напруга була також підключена до пристрою 8, тобто R51 (рис. 3.11).



Рис. 3.11

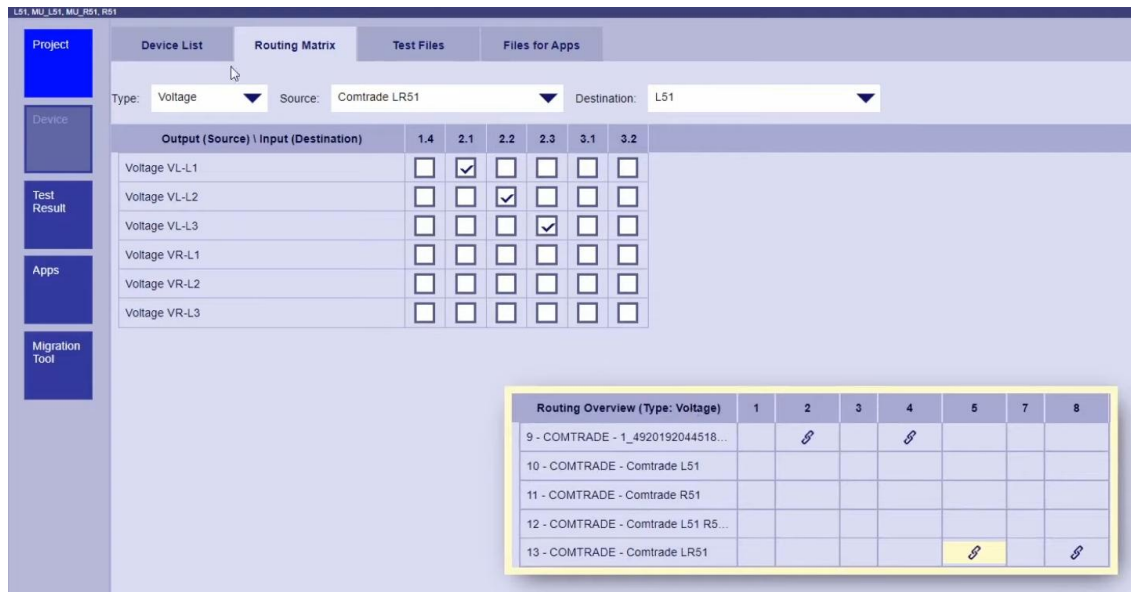


Рис. 3.12

Прив'язка сигналів повинна виконуватися, коли симуляція зупинена, тепер підготовка готова і ми можемо розпочати симуляцію в цьому додатку. Ми будемо тестувати також GOOSE-повідомлення. Ми маємо положення вимикачів і роз'єднувачів, що зафіксовані об'єднувальними пристроями (Merging Unit), і вони передаються за допомогою протоколу GOOSE на пристрої захисту.

Також ми маємо команди на відключення (trip), які генеруються пристроєм захисту і передаються на об'єднувальний пристрій.

Почнемо із статичної інжекції струмів та напруг (Рис. 3.13). Зверніть увагу, що ми можемо об'єднати варіанти статичної інжекції та відтворення записів з COMTRADE файлів, при цьому є можливість тестування різних позицій вимикачів.

Для статичної інжекції ми можемо використовувати деякі набори попередньо встановлених та збережених значень. В такому наборі Preset 87L автоматичний вимикач і роз'єднувачі примусово замикаються шляхом подання відповідних значень на відповідні бінарні входи.

Об'єднані в блоки ці значення будуть передані як тільки ми їх введемо, а потім положення вимикача та роз'єднувачів будуть показані на панелі відображення захисних пристроїв (рис. 3.14, 3.115, 3.16).

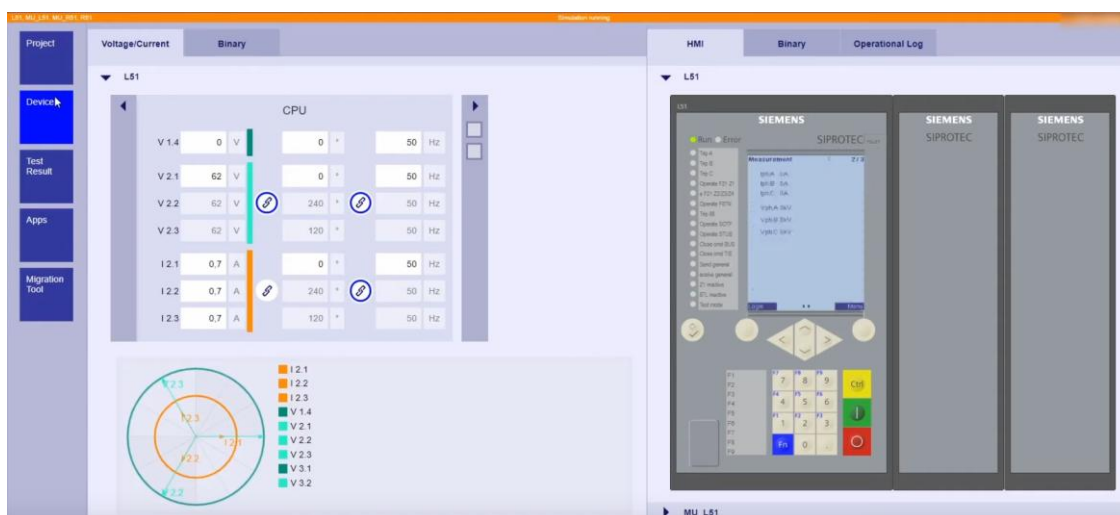
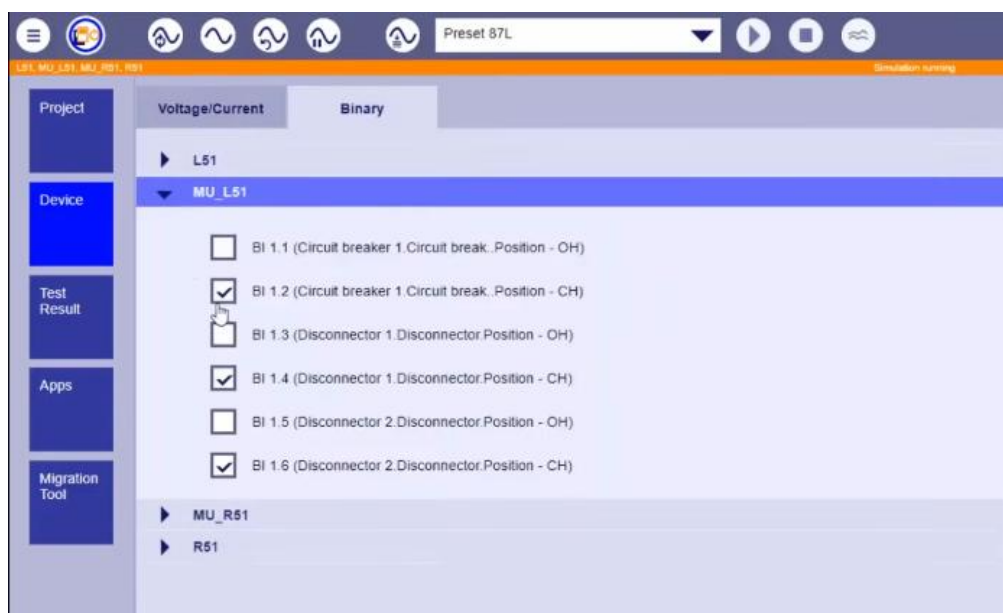


Рис. 3.13



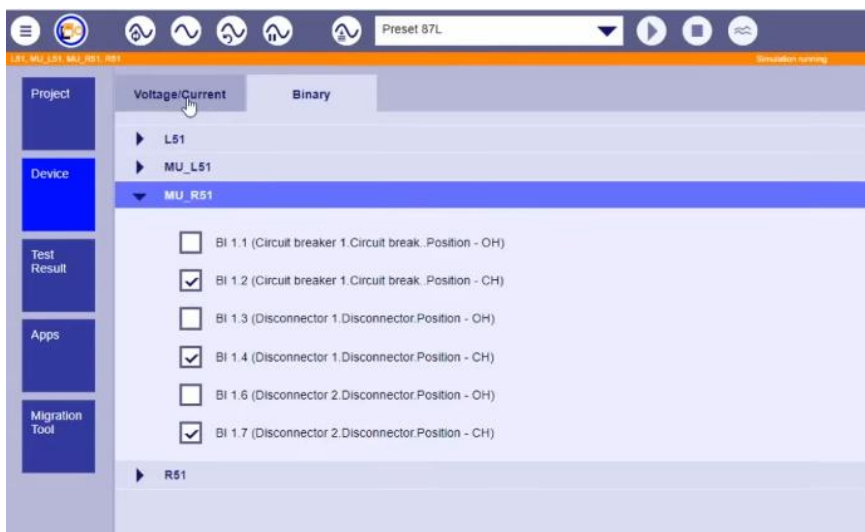


Рис. 3.14

Рис. 3.15

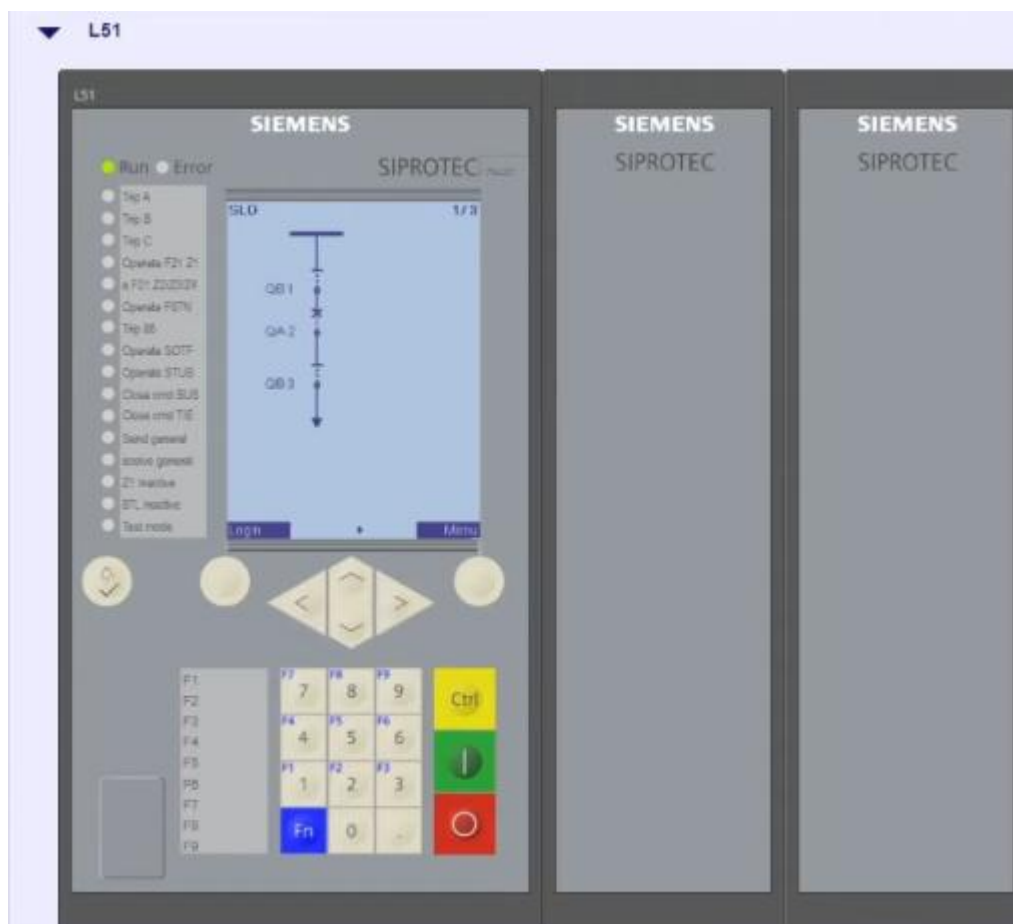


Рис. 3.16

Якщо ми хочемо протестувати інше положення вимикача, переходимо, наприклад, до блоку MU_L51 і форсуємо бінарні входи, пов'язані з

автоматичним вимикачем на відкрите положення. Ця зміна також відображається на дисплеї пристрою захисту (рис. 3.17).

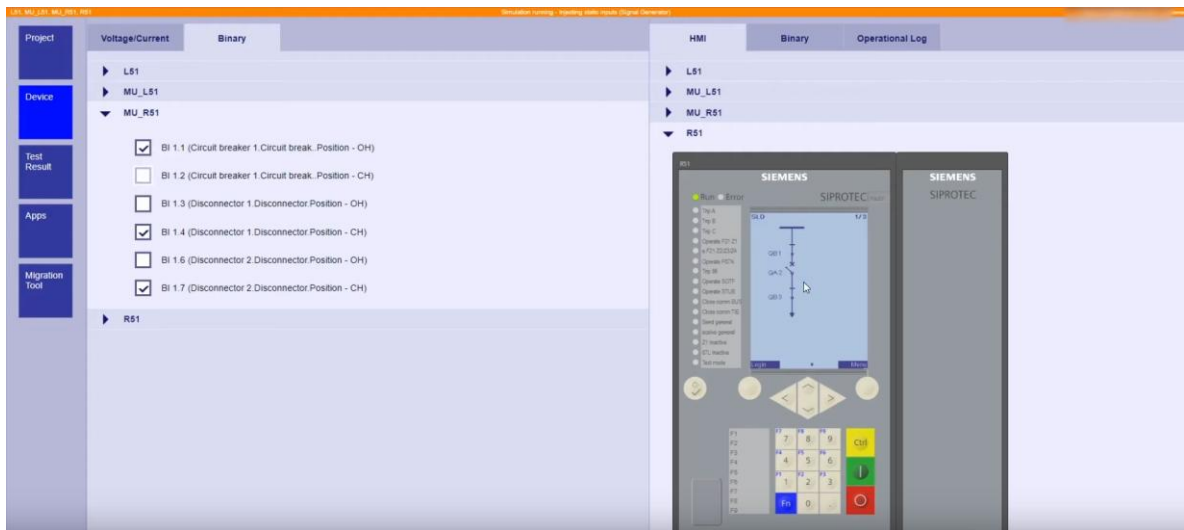


Рис. 3.17

Таким чином, ми можемо перевірити GOOSE повідомлення, що відповідають положенням первинних пристроїв у цифровому двійнику.

За допомогою статичного тесту можна також перевірити правильне масштабування та конфігурацію аналогових сигналів (рис. 3.18).

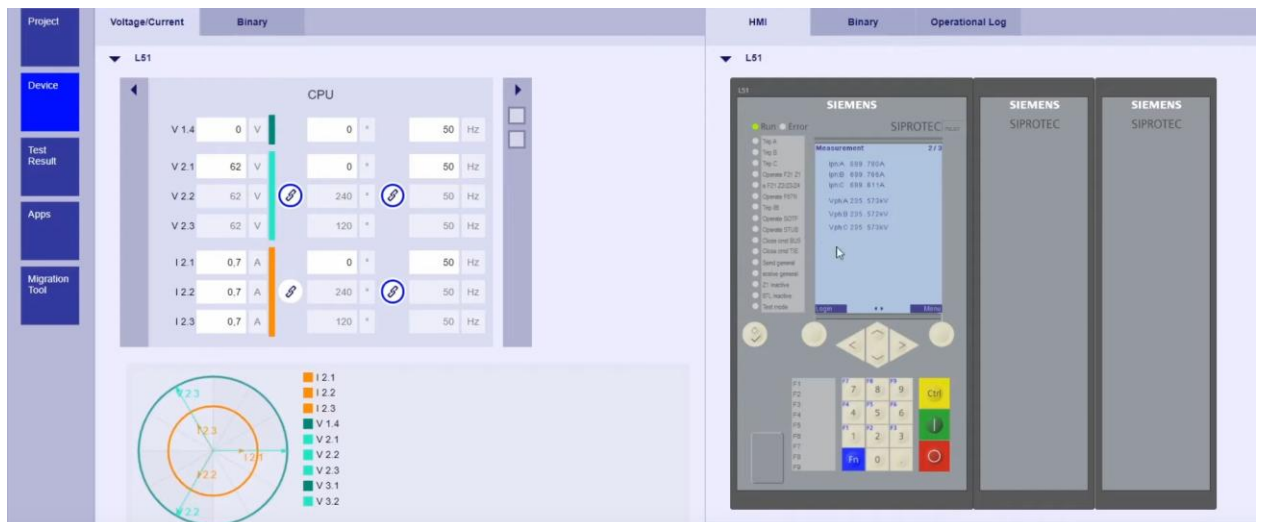


Рис. 3.18

З іншого боку команда на відключення подається захисним пристроєм (рис. 3.19), а вимикач підключений до об'єднувального пристрою, і це означає, що треба подати команду на відключення від реле до цього

об'єднувального пристрою. Для цього ми також використаємо GOOSE повідомлення.

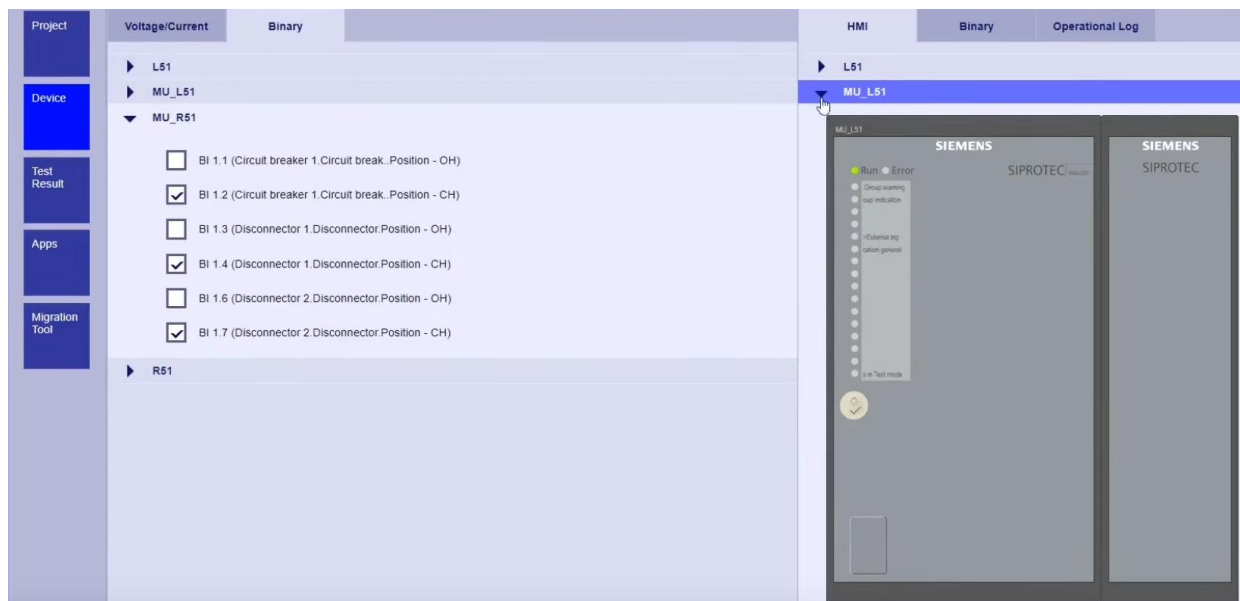


Рис. 3.19

На об'єднувальному пристрої налаштована індикація таким чином, щоб показати отримання зовнішнього сигналу на роз'єднання, а також відповідний сигнал, що генерується об'єднувальним пристроєм для передачі на вимикач.

Тепер ми готові почати перевірку працездатності захисту. Спочатку ми протестуємо диференційний захист лінії. Ми маємо підготовлений COMTRADE файл, тому зараз відтворимо його та проаналізуємо реакцію пристроїв захисту, тому обираємо відповідний файл, а потім натискаємо на кнопку відтворення.

На пристрої L51 спрацював диференціальний захист лінії через замикання у фазі В, що відображається на дисплеї (рис. 3.20).

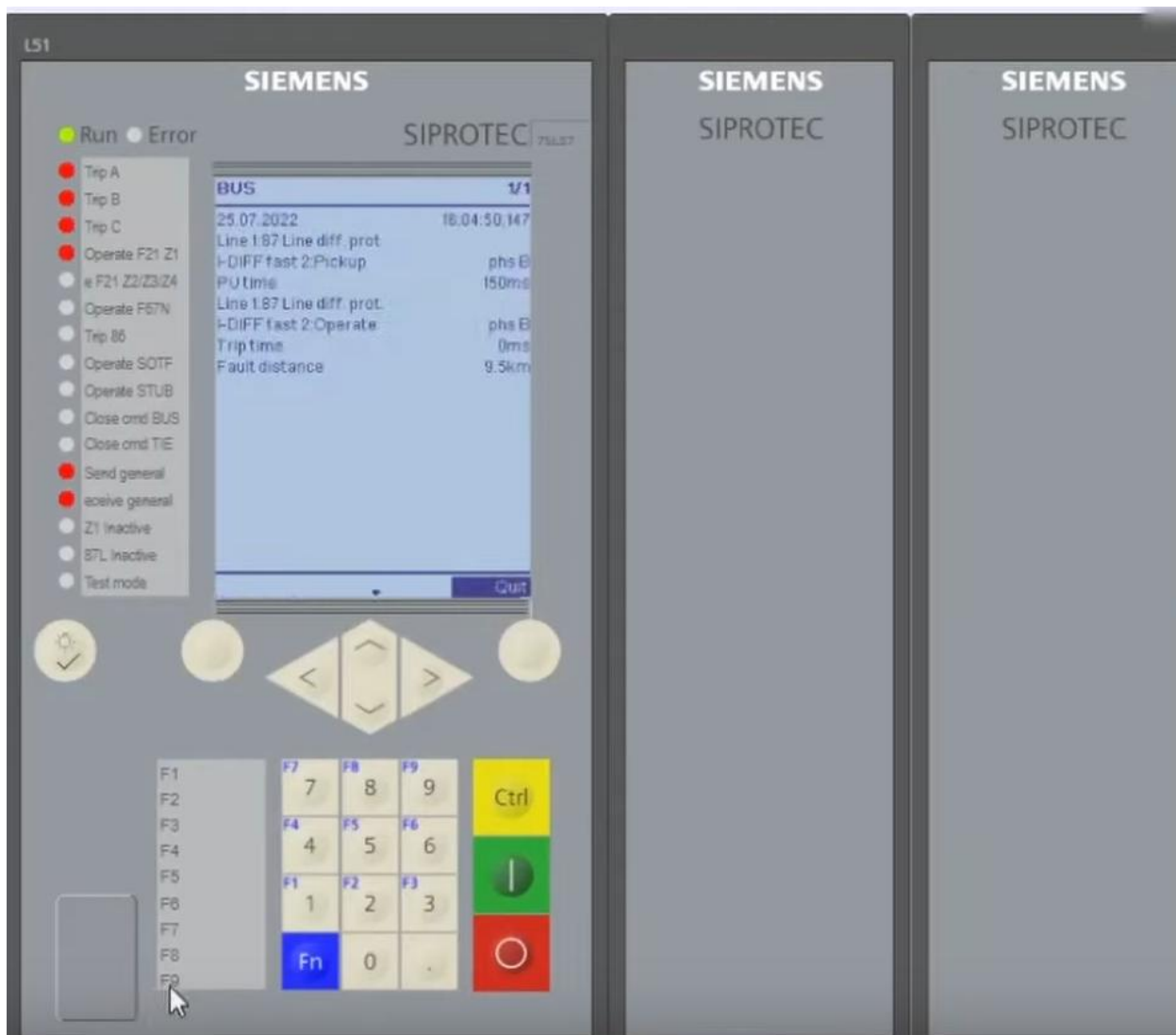


Рис. 3.20

У MU-L51 світлодіоди показують, що команда на відключення отримана та оброблена об'єднувальним блоком (рис. 3.21).

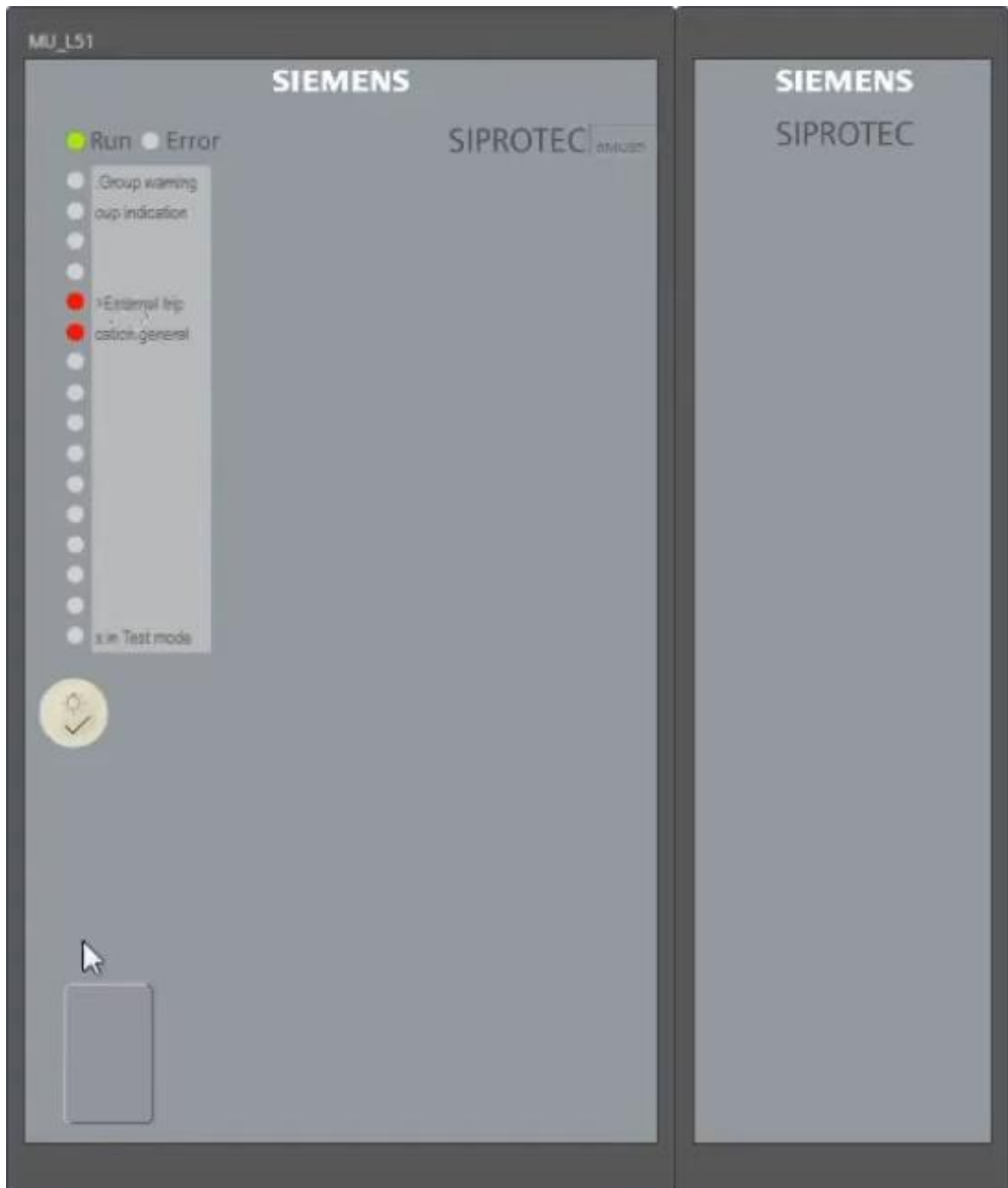


Рис. 3.21

Якщо ми перевіримо пристрій, розташований на правій стороні лінії R51, то побачимо, що він також спрацьовує з причини замикання на фазі В і MU-R51 отримує і обробляє сигнал також. Очищаємо світлодіоди та дисплеї на пристроях і готуємося до наступного дослідження.

В наступному досліді ми збираємось перевірити реакцію дистанційного захисту. Тому ми повинні вимкнути диференціальний захист лінії, для цього в нашому проекті використовується функціональна клавіша F4 в пристрої L51 (рис. 3.22).

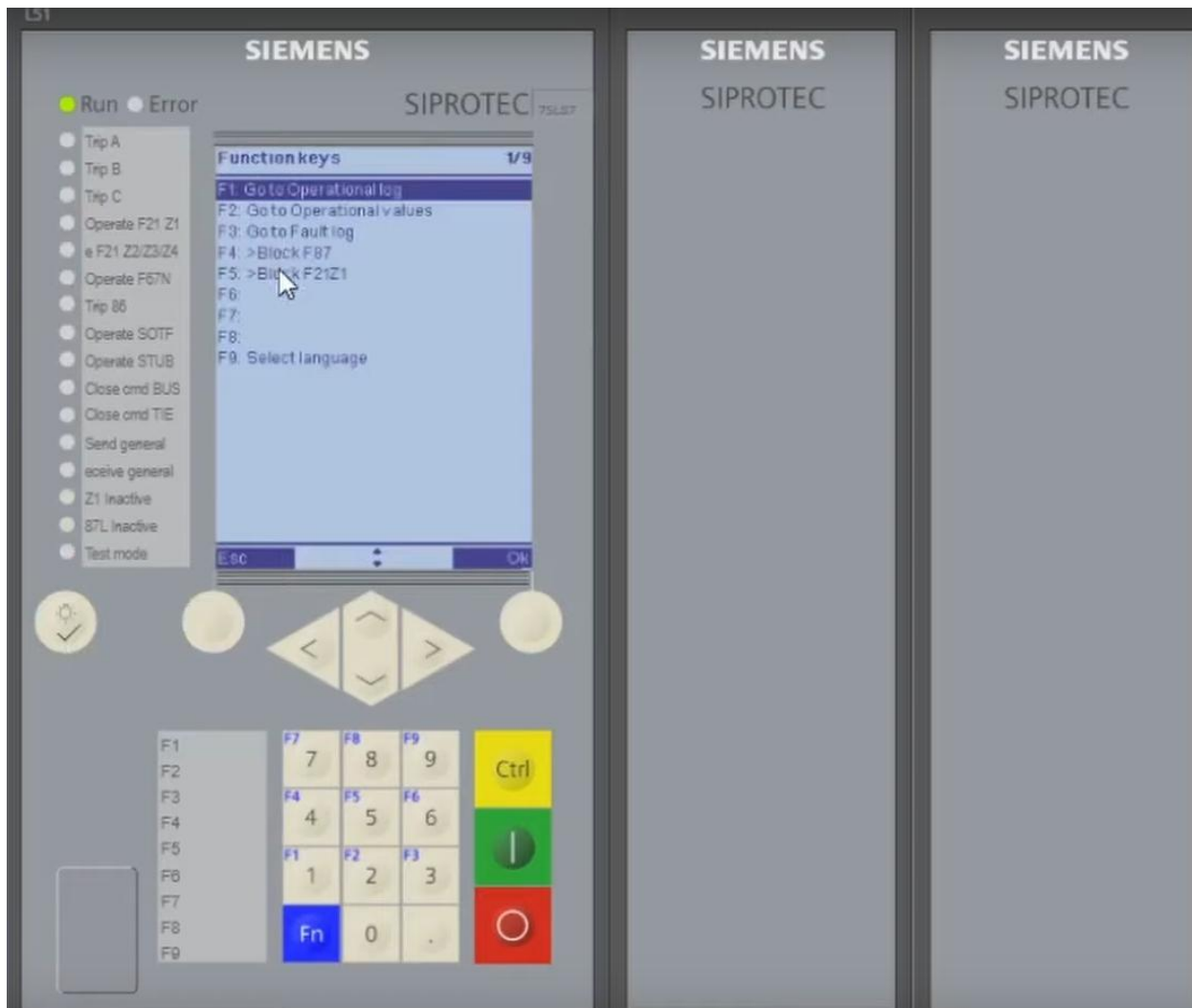


Рис. 3.22

Виконуємо блокування і доводимо за допомогою індикації (87L inactive), що диференціальний захист лінії на обох пристроях захисту заблоковані. На світлодіоді 15 з'являється індикація, що захист 87L неактивний (рис. 3.23).

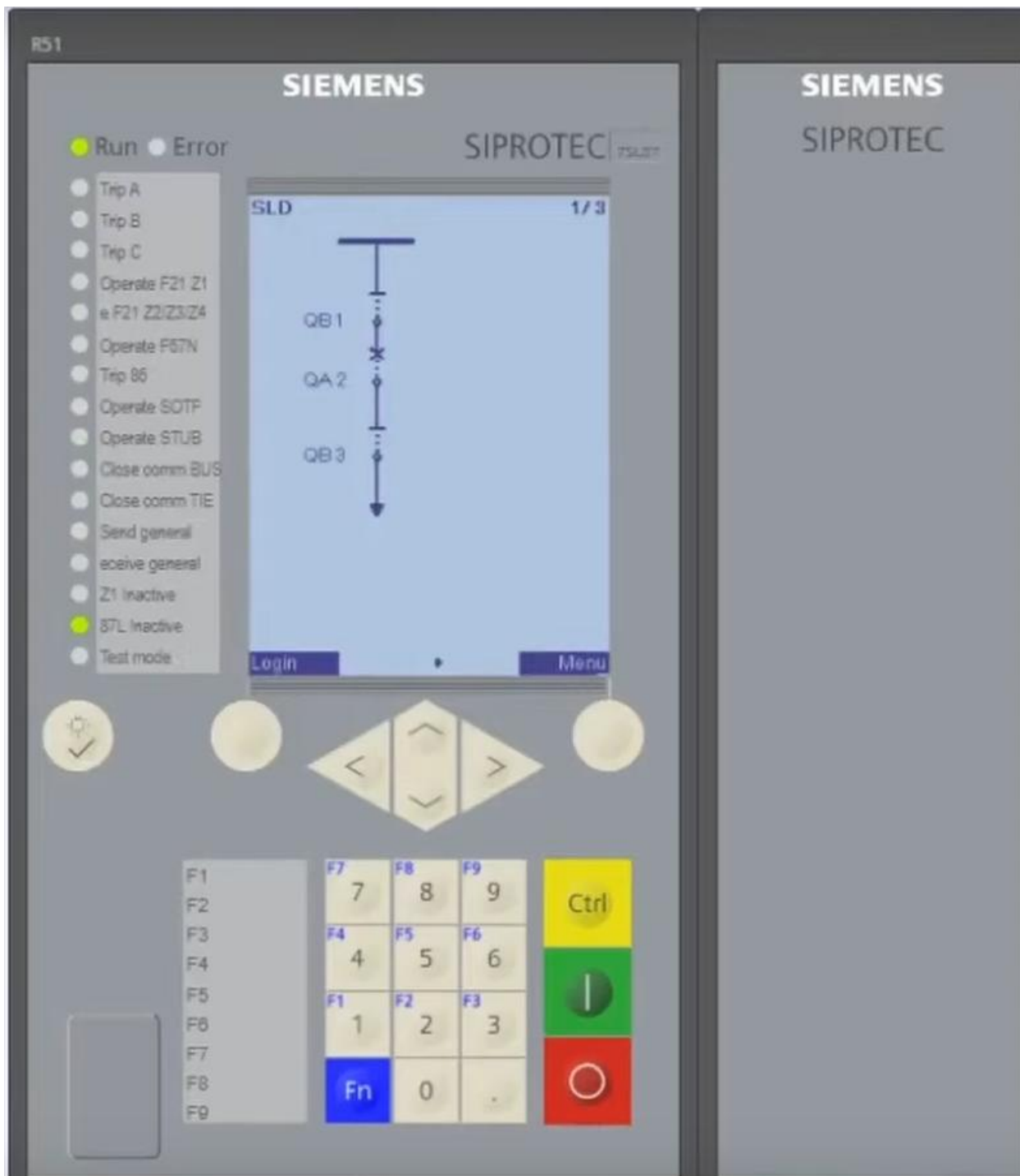


Рис. 3.23

Ми продовжуємо дослідження відтворенням COMTRADE файлу ще раз і перевіряємо результати (рис. 3.24).

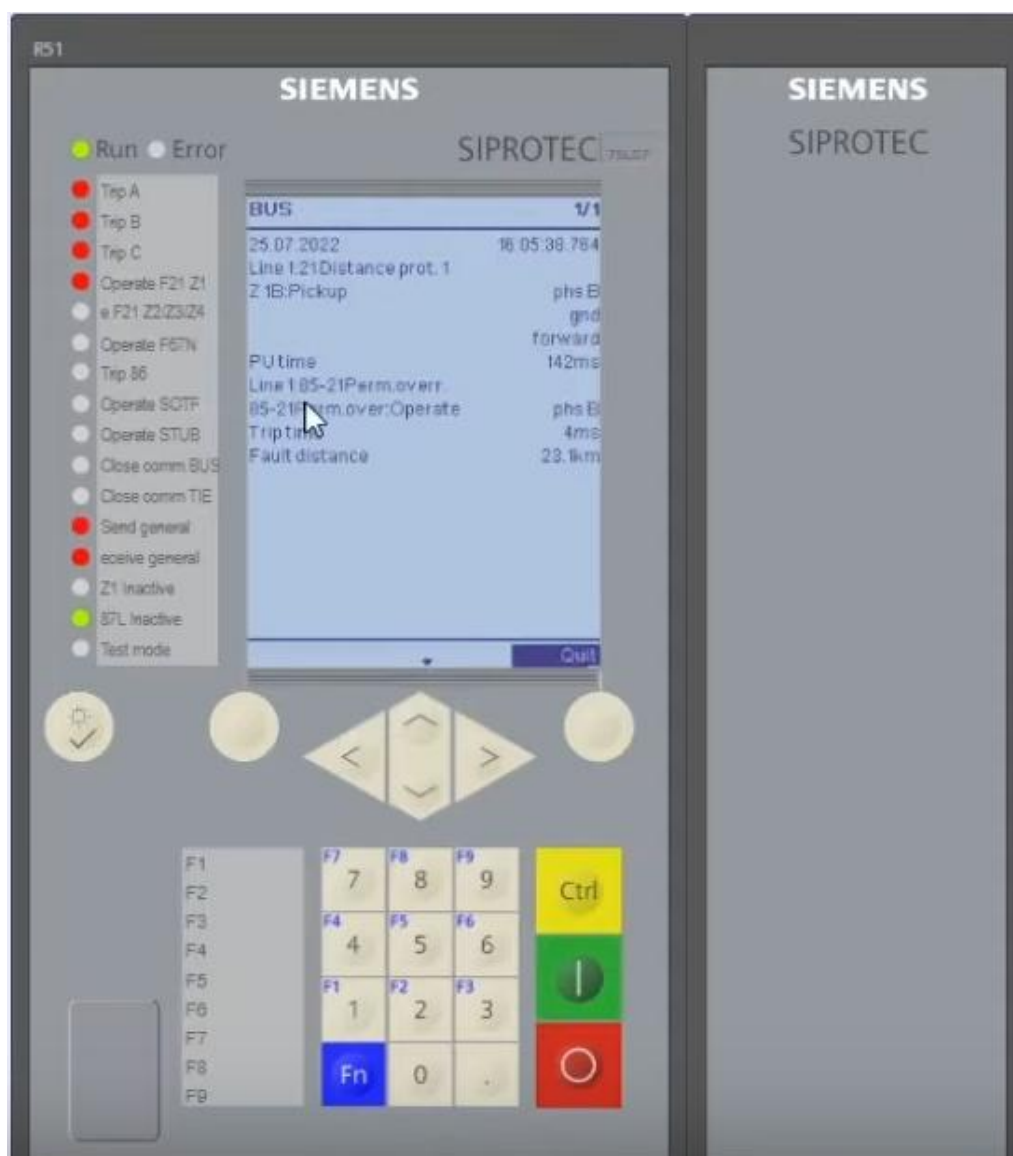


Рис. 3.24

Зазвичай ми хочемо проаналізувати кожен тест більш детально.

З огляду на це, в програмному середовищі цифрових двійників SIPROTEC є кілька додатків, які можна використовувати для покращення аналізу результатів тестування (рис. 3.25).



Рис. 3.25

Наприклад, ви можете отримати через Інтернет доступ до користувацького інтерфейсу пристроїв для читання журналу реєстрації аварійних подій і отримати більше інформації про ці події (рис. 3.26).

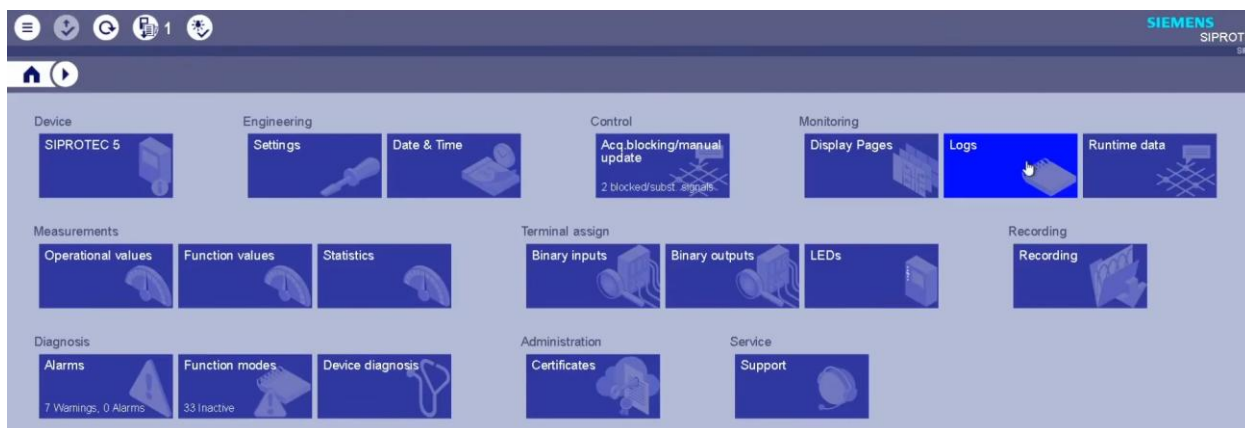


Рис. 3.26

Також можна завантажити записи осцилограм аварійних подій для аналізу за допомогою програмного забезпечення SIGRA (рис. 3.27).

File name	Time stamp	Functions structure	Name	Value
FRA00005	2022-07-25, 16:05:39.343	BUS Circuit break.	Definitive trip	off
FRA00005	2022-07-25, 16:05:39.343	TIE Circuit break.	Definitive trip	off
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.983	Line 1 Fault locator	Fault loop	BG
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.983	Line 1 Fault locator	Fault distance in %	29.64%
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.983	Line 1 Fault locator	Fault distance	9.49km
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.983	Line 1 Fault locator	Fault reactance sec.	1.40Q
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.983	Line 1 Fault locator	Fault resistance sec.	0.51Q
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.983	Line 1 Fault locator	Fault reactance prim.	5.31Q
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.983	Line 1 Fault locator	Fault resistance prim.	1.93Q
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.983	Line 1:85-21Perm over: 85-21Perm over	Send	off
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.957	User Signal	TG BYPASS_FSC_P2	off
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.957	User Trips	Trip Fase C BUS	off
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.957	User Trips	Trip Fase B BUS	off
FRA00005	2022-07-25, 16:05:38.957	User Trips	Trip Fase A BUS	off

Рис. 3.27

При необхідності можна внести тимчасові зміни за допомогою веб-інтерфейсу та постійні зміни в додатку DIGSI 5 для підготовки фінальної конфігурації до завантаження.

Висновки до розділу 3

В цьому програмному середовищі цифрового двійника SIPROTEC 5 можна побачити і протестувати налаштування пристроїв релейного захисту, алгоритми функціонування GOOSE, інjektувати файли осцилограм COMTRADE, аналізувати події пошкодження мережі, виправляти помилки в конфігураційних файлах і багато іншого, залишаючись при цьому в хмарному середовищі і не використовуючи фізичних пристроїв (рис. 3.28).

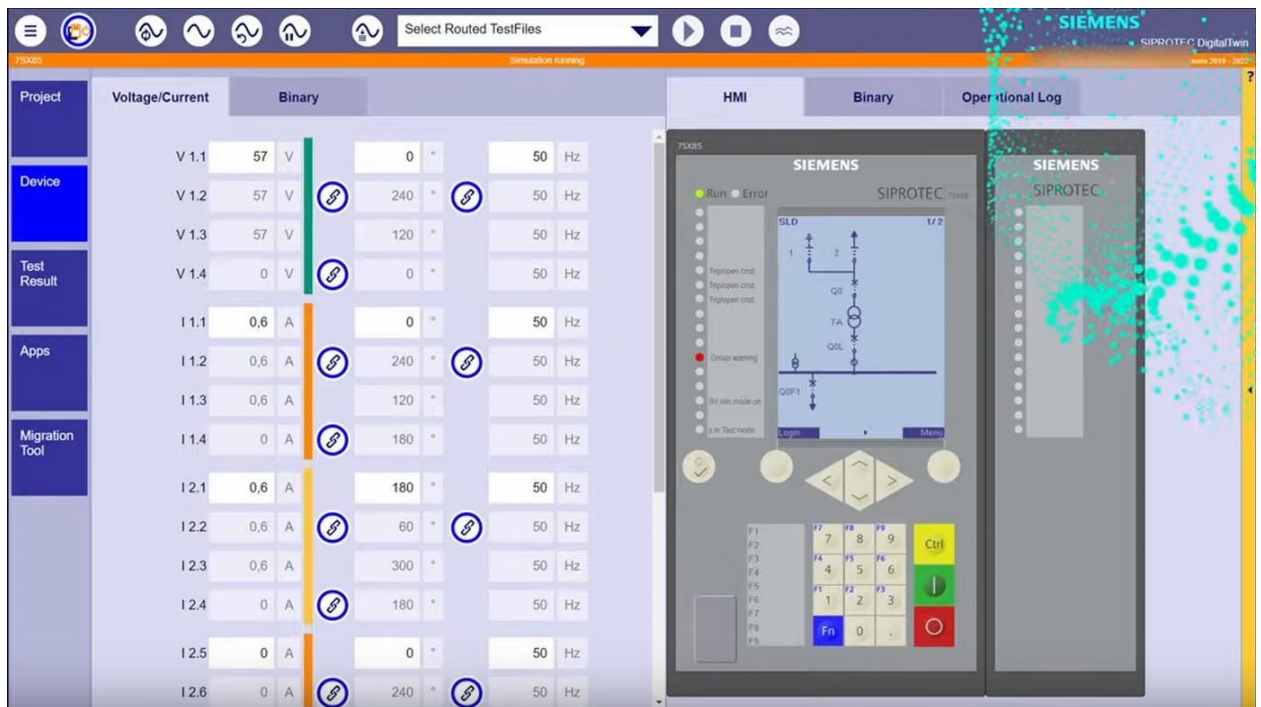


Рис. 3.28

ВИСНОВКИ

Основний зміст цієї роботи полягає в наступному. Перша частина містить попередній вступ до поняття цифрового двійника. У другій частині коротко представлено додаток стан технології цифрового двійника в електроенергетиці. У третій частині детально аналізується застосування цифрових двійників в електроенергетиці, узагальнюється та аналізується структура дизайну, основна технологія та шлях впровадження PSDT через додаток у конкретних сценаріях.

На основі додатків Digital Twins в електроенергетиці, у цій роботі аналізуються деякі застосування в управлінні енергетичними системами, обладнанням прогнозування та діагностика несправностей, а також живлення онлайн-аналізу від попиту на ядро технології Digital Twins і Digital Twins інтелекту енергосистеми. Отже, представлені конструкція основи, ядра технології та підходи до впровадження цифрового двійника енергосистеми (PSDT). Проаналізовано проблеми, з якими стикаються застосунки Digital Twins в електроенергетиці, проаналізовано та узагальнено майбутню тенденцію розвитку Digital Twins.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ISO/IEC organization. 2019. ISO/IEC 21823-1 Internet of Things (IoT) - Interoperability of iot systems - Part 1: Framework.
2. Tao, F.; Sui, F.; Liu, A.; Qi, Q.; Zhang, M.; Song, B.; Lu, S.; Nee, A. Digital twin-driven product design framework. *Int. J. Prod. Res.* **2018**, *57*, 3935–3953.
3. ISO/TC 184/SC 1 N417. Task Force: Digital Twin Data Architecture. 2019-06-25.
4. Details of the administration shell. Federal Ministry of Economics and Energy (BMWi). ZVEI & Plattform Industrie 4.0. Online: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details-of-the-Asset-Administration-Shell-Part1.html>
5. Structure of the administrative shell. Trilateral perspectives of France, Italy and Germany. Ministry of Economy and Finance and Federal Ministry of Economy and Energy (BMWi). Alliance Industrie du Tour, Piano Industrie 4.0 & Plattform Industrie 4.0. Online: <https://www.plattformi40.de/I40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/hm-2018-trilaterale-coop.html>
5. Details of the administration shell. Federal Ministry of Economics and Energy (BMWi). ZVEI & Plattform Industrie 4.0. Online:
6. Greaves, M.V. Digital Double: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication; Florida Institute of Technology: Melbourne, FL, USA, 2014.
7. Tao, F.; Sui, F.; Liu, A.; Qi, Q.; Zhang, M.; Song, B.; Lu, S.; No, A. Digital dual product design system. *International J. Prod. res.* 2018, *57*, 3935–3953.
8. Brandtstaedter, H.; Ludwig K.; Huebner, L.; E. Tsuchnyka; Yungevych, A.; Wever, U. Digital doubles for large electric drives. In Proceedings of the 2018 European Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC Europe), Antwerp, Belgium, 5–7 June 2018.
9. Jain, P.; Poon, J.; Singh, JP; Spanos, K.; Sanders, S.; Panda, S.K. A Digital Dual Approach for Fault Diagnosis in a Distributed Photovoltaic System. *IEEE Trans. Power Electron.* 2020, *35*, 940–956.

10. Dufour, K.; Sohomonyan, Z.; Li, W. Equipment in-cycle testing of modern on-board power systems using digital twins. In Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Power Electronics, Electric Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, Italy, 20–22 June 2018.
11. Moussa, S.; Ay-Haddad, K.; Kejar, B.; Merkhouf, A. Finite-scale simulation-based digital twin consideration of a large hydro-generator. In Proceedings of the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, USA, 21–23 October 2018; P. 553–558.
12. Sivalingam, K.; Sepulveda, M.; Vesna, M.; Davies, P. Review and Development of a Methodology for Predicting the Remaining Useful Life of Offshore Fixed and Floating Power Converters for Wind Turbines from a Digital Dual Technology Perspective. In Proceedings of the 2018 IEEE 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), Singapore, 24–26 March 2018; P. 197–204.
13. Brosinsky, C.; Westermann, D.; Krebs, R. Recent and promising developments in power system control centers: Adaptation of digital twin technology for power system control centers. In Proceedings of the 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Limassol, Cyprus, June 3–7, 2018.
14. Pileji, P.; Verriet, J.; Broekhuijsen, J.; van Leeuwen, C.; Wijbrandi, W.; Konsman, M. Digital twin for cyber-physical energy systems. In Proceedings of the 2019 7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Power Systems (MSCPES), Montreal, Quebec, Canada, 15 April 2019.
15. Karanzhkar, N.; Joglekar, A.; Mohanty, S.; Prabhu, V.; Raghunath, D.; Sundaresan, R. Digital Twin for Energy Optimization in an SMT-PCB Assembly Line. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligent System (IOTAIS), Bali, Indonesia, 1–3 November 2018;
- 16.P. 85–89. Liu, J.; Lu, X.; Zhou, Yu.; Cui, J.; Wang, S.; Zhao, Z. Development of Intelligent Photovoltaic Power Plant Operation and Maintenance System Based on Digital Twin. In Proceedings of the 6th International Conference on

- Robotics and Automation 2021 (ICRAE), Singapore, 18–20 November 2021; P. 206–211.
17. Liu, Yu.; Liu, X.; Guo, J.; Lu, R.; Lv, Z. Artificial Intelligence-Based Digital Twins of Wave Energy Generation. In Proceedings of the 2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), Christchurch, New Zealand, 12–16 March 2022; P. 718–719. [Google Scholar]
 18. SIPROTECH DigitalTwin. Available online: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:849e6448-9026-4afb-9b54-3395a21ad76f/siprotecdigitaltwincustomerpresentation.pdf> (viewed 26 June 2022).
 19. Siemens, MindSphere. Available online: <https://siemens.mindsphere.io/en> (accessed on 26 June 2022).
 20. ABBA ability. Available online: <https://global.abb/topic/ability/en> (accessed 28 June 2022).
 21. Digital Twin Software, GE Digital. Available online: <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin> (accessed 24 June 2022).
 22. Life Cycle Engineering Optimization - An Overview, IBM. Available online: <https://www.ibm.com/products/engineering-lifecycle-optimization> (accessed 22 June 2022).
 23. Paladin Asset Optimization, Power Analytics Corporation. Available online: <https://www.poweranalytics.com/asset-optimization/> (accessed 22 June 2022).
 24. PRANA Predictive Analytics Systems, equipment performance monitoring. Available online: <https://prana-system.com/en/?prefer=1> (accessed 23 June 2022).
 25. Software and technical complex Virtual-digital nuclear power plant with VVER. Available online: <http://en.ibrae.ac.ru/contents/362> (accessed 27 June 2022).

26. Rossetti. Concept of digital transformation 2030. Available online: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (accessed on 19 June 2022).
27. Obi, T.; Iwasaki, N. Smart Government Using Digital Twin in Japan. In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on ICT for the Smart Society (ICISS), Bandung, Indonesia, 2–4 August 2021 [Google Scholar]
28. Halyasmaa, A.I.; S.A. Dmitriev; Glushkov D.A.; Baltin D.A.; Babushkina N. A. Life cycle monitoring of electrical equipment. *Adv. Mater. res.* 2014, 1008–1009, 536–539. [Google Scholar] [CrossRef]
29. ISO/IEC/IEEE 24748-1:2018(E); Systems and software development — Life cycle management — Part 1: Guidelines for life cycle management. IEEE: New York, NY, USA, 2018.
30. Simões-Marques, M.J. Modeling and modeling in the system life cycle. *Procedia Manuf.* 2015, 3, 785–792. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
31. Halyasmaa, A.I.; M. D. Senyuk; Yeroshenko S.A. State analysis of high-voltage current transformers based on gradient amplification on decision trees. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2021, 36, 2154–2163. [Google Scholar] [CrossRef]
32. Wu, J.; Yang, Yu.; Cheng, X.; Zuo, H.; Cheng, Z. Overview of Digital Twin Technology Development. In Proceedings of the 2020 IEEE China Automation Congress (CAC), Shanghai, China, 6–8 November 2020; page 4901–4906. [Google Scholar]
33. Zhao, J.; Zhu, J. A Digital Dual Approach for Fault Diagnosis in PEM Fuel Cell Systems. In Proceedings of the 2021 IEEE First International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), Beijing, China, 15 July–15 August 2021; P. 168–171. [Google Scholar]
34. Mihai, S.; Yakub, M.; Hung, D.V.; Davis, V.; Tovakel, P.; Raza, M.; Karamanoglu, M.; Barne, B.; Shetve D.; Prasad, R.V.; etc. Digital Twins: A Survey of Emerging Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects.

- IEEE Commun. Surv. Tutor. 2022, 24, 2255–2291. [Google Scholar]
[CrossRef]
35. GE Digital Twin. Analytical system for a digital power plant. Available online: https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/Digital-Twin-for-the-digital-power-plant.pdf (accessed 20 August 2022).
 36. Olatunji, O.O.; Adedeji, P.A.; Madushele, N.; Jen, T.-K. Overview of Digital Twin technology in wind turbine fault diagnosis and condition monitoring. In Proceedings of the 2021 IEEE 12th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT), Cape Town, South Africa, 13–15 May 2021; P. 201–207. [Google Scholar]
 37. Felsberger, L.; Todd, B.; Kranzlmüller, D. Optimizing Power Converter Maintenance Using a Dual Model-Based Digital Reliability Paradigm. In Proceedings of the 4th International Conference on System Reliability and Security (ICSRS) 2019, Rome, Italy, 20–22 November 2019; P. 213–217. [Google Scholar]
 38. Dong, L.; Zhou, X.; Zhao, F.; He, S.; Lu, Z.; Feng, J. Basic Modeling and Simulation Modeling Technology for Aircraft Design Digital Twin. In Proceedings of the 2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Shanghai, China, 12–14 September 2020 [Google Scholar]
 39. Andrushkevich, S.; S. Kovalev; E. Nefyodov. Approaches to the development and application of digital duplicates of energy systems. Figure. Substation 2019, 12, 28–34. [Google Scholar]
 40. Borovkov A.; Ryabov Yu. Definition, development and application of finger doppelgangers. Figure. Substation 2019, 12, 20–25. [Google Scholar]
 41. Chakraborty, S.; Adhikari, S. A machine learning-based digital double for dynamical systems with multiple time scales. calculation Structure. 2021, 243, 106410. [Google Scholar] [CrossRef]
 42. Gole, A.M. Guidelines for modeling power electronics in power engineering. IEEE Trans. Power Deliv. 1997, 12, 505–514. [Google Scholar] [CrossRef]

43. Lu, Yu.; Liu, Z.; Su, K.; Wang, B. Machine Learning-Based Digital Dual Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry. *International J. Inf. driver* 2019, 49, 502–519. [Google Scholar] [CrossRef]
44. Digital Twin—Agent-Based Turbine Operation & Maintenance (ATOM). Available online: [https://www.anylogic.com/upload/conference/2018/presentations/digital-twin-agent-based-turbine-operations-and-maintenance\(atom\)\(decisionlab\).pdf](https://www.anylogic.com/upload/conference/2018/presentations/digital-twin-agent-based-turbine-operations-and-maintenance(atom)(decisionlab).pdf) (accessed on: 10 October 2022).
45. Iosifidis, N. Reliability of wind turbine power modules using high-resolution wind data reconstruction: A digital dual concept. In *Proceedings of the 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exhibition (ECCE)*, Singapore, 24–27 May 2021; P. 3630–3637. [Google Scholar]
46. Lee, Yu.; Shen, X. New Wind Speed Measurement Methodology for Wind Turbines Based on Digital Twin Technology. *IEEE Trans. tool. Measurements* 2022, 71, 2503213. [Google Scholar] [CrossRef]
47. Fahim, M.; Sharma, V.; Tsao, T.-V.; Canber, B.; Duong, T.K. A machine learning-based digital twin for predictive modeling in wind turbines. *IEEE Access* 2022, 10, 14184–14194. [Google Scholar] [CrossRef]
48. Núñez-Montoya, B.; Naranjo-Riofrio, K.; Lopez-Estrada, L.; Tutivén, C.; Vidal, Yu.; Fajardo-Pruna, M. Development of a Digital-Twin Wind Turbine for Failure Prediction: First Results. In *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Systems and Emerging Technologies (IC_ASET) 2022*, Hammamet, Tunisia, 22–25 March 2022; P. 29–33. [Google Scholar]
49. Xu H.; Wang, L.; Zhai, Yu.; Su, G.; Yu, X.; Zhao, C. Design of fail-safe patrol system for electric power equipment based on digital twin technology. In *Proceedings of the 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, Hangzhou, China, 15–17 April 2022; pp. 2135–2139. [Google Scholar]
50. Ayo-Imoru, R.M.; Ali, A.A.; Bokoro, P.N. An enhanced fault diagnosis in nuclear power plants for a digital twin framework. In *Proceedings of the 2021*

- International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Cape Town, South Africa, 9–10 December 2021. [Google Scholar]
51. Halyasmaa, A.I.; Yeroshenko S.A.; Shatunova D.V.; Larionova A.A.; Egorov, A.O. Digital twin technology as a tool for increasing the reliability of electrical equipment. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020, 836, 012005. [Google Scholar] [CrossRef]
 52. Jiang, Z.; Guo, Yu.; Wang, Z. Digital twin to improve virtual reality integration of industrial IOT. *J. Ind. Inf. integr.* 2021, 22, 100196. [Google Scholar] [CrossRef]
 53. Lu, Yu.; Huang, X.; Zhang, K.; Maharjan, S.; Zhang Y. Communication-Efficient Federated Learning and Permissioned Blockchain for Digital Dual Networks. *IEEE Internet Things J.* 2021, 8, 2276–2288. [Google Scholar] [CrossRef]
 54. Hu, L.; Nguyen N.T.; Tao, V.; Leu, M.C.; Liu, X.F.; Shahriar, M.R.; El Sunny, S.N. Modeling cloud-based digital twins for smart manufacturing with MT connectivity. *Procedia Manuf.* 2018, 26, 1193–1203. [Google Scholar] [CrossRef] Озбай. U., Zergeroglu, E., and Sivrioglu, S. (2008) Адаптивне керування зворотним кроком вітрових турбін із змінною швидкістю. *Міжнародний журнал контролю*, 81: 910–919.
 55. Chen, J.W., Wen, K.Y., Song, Y.D. (2014) Power control strategy for variable speed and fixed pitch wind turbines. In: 13th International Conference on Automation Control Robotics and Vision (ICARCV), Singapore, p. 559-564.
 56. Chen, J.W., Chen, J., Gong, K.Y. (2013) A new general power control strategy for variable-speed and fixed-pitch wind turbines over the entire wind speed range. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60: 2652-2660. ICAESEE 2020 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 647 (2021) 012015 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/647/1/012015 9
 57. Petkovich, D., Choibashich, Zh., Nikolic, V., Shamshirband, S., Kia, M. L. M., Anuar, N. B., Vahab, A. V. A. (2014) Adaptive neuro-fuzzy maximum power

- selection of a continuously variable transmission mode wind turbine. *Energy*, 64: 868–874.
58. Roh, K., Choi, H.H. (2005) Application of a neural network controller for maximum power extraction of a grid-connected wind turbine. *Electrical engineering*, 88: 45–53.
59. Rajendran, S., Jena D. (2015) Sliding-Mode Inverse Control of a Variable-Speed Wind Turbine for Power Optimization. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 3: 402-410.
60. Barys Bidikli (2019) Robust Adaptive Control Design for Variable Speed Wind Turbine Rotor Speed Control. *International Journal of Control*, p. 1-14.
61. Zeitouni M.J., Parvaresh A., Abrazeh S., Mohseni S.R. etc. (2020) Digital Twins-Assisted Design of Next Generation Advanced Controllers for Power Systems and Electronics: Wind Turbine as a Case Study. *Inventions*, 5: 19.
62. Parvaresh A., Abrazeh S., Mohseni S.R. (2020) A Novel Deep Learning-Based Digital Twin Technology with a Stepper-Based Controller for Variable-Speed Wind Turbine Pitch Control. *Designs*, 4: 15.
63. Tao F., Liu W.R., Zhang M., Hu T.L. etc. (2020) A five-dimensional digital twin model and its ten applications. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 25: 1-18.
64. Tao F., Liu W.R., Liu J.H., et al. (2018) Digital twin and its potential application research”, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 24: 1-18.
65. Tao, F., Zhang, M., Liu, Y.S., Ni, A.Y.C. (2018) Digital Dual Health Prediction and Management for Complex Equipment. *Cirp Annals*, 67: 169-172.
66. Zhou, M., Shang, X.W., Zhao, L., Yang, J.F., Shi, D.Y., Chen, Y. (2016) Development of a fast online real-time dynamic safety assessment system. *IEEE Smart Grid News*.
67. Zhou, M., Feng, D.H. (2018) Application of In-Memory Computing to Online Power Grid Analysis. *IFAC-PapersOnLine*, 51: 132-137.

68. Shi, DY, Yang, JF, Chen, LK, Yu, ZH, Li, H, Chen, BR. (2018) Analysis of fast online assessment of transient stability based on Siamese network. In: International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, p. 4030-4034. Чжоу, М., Ян, Дж. Ф. (2018) Нова архітектура рішення для онлайн-аналізу енергосистеми. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 4: 250-256.
69. Zhou, M., Yan, J., Feng, D.H. (2019) Digital dual structure and its application to online analysis of power networks. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 5: 391-398.
70. Zhou, M., Yan, J., Zhou, X.X. (2020) Online real-time power grid analysis. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 6: 236-238. Доступно в Інтернеті: <https://projects.eclipse.org/projects/iot>
71. SIPROTEC Digital Twin Virtual testing of SIPROTEC 5 protection devices. Siemens 2019-2023. Siemens.com Global Website: <https://www.siprotec-digitaltwin.siemens.com/#/digital-twin-splash-screen>
72. Electrical Power System Analysis & Operation Software. 2024 Operation Technology, Inc: <https://etap.com/products/etap-digital-twin>
73. General Electric. Inventing the future of industry. GE's dedicated team, leading technology 2024: <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>
74. Digital Twins for Industrial Applications DEFINITION, BUSINESS VALUES, DESIGN ASPECTS, STANDARDS AND USE CASES An Industrial Internet Consortium White Paper Version 1.0 2020-02-18: https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf
75. The Application of Digital Twin on Power Industry To cite this article: Jianping Huang et al 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 647 012015: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/647/1/012015/pdf>