

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Києво-Могилянська академія»
Факультет інформатики
Кафедра інформатики

Магістерська робота
Освітній ступінь – магістр

На тему: **«ТЕХНІЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ
ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ»**

Виконав: студент 2-го року навчання,
Магістерської програми
Спеціальності
F2 Інженерія програмного забезпечення
Майстер Іван Сергійович

Керівник Савченко Т.В.
Кандидат технічних наук, доцент

Рецензент _____

Магістерська робота захищена
З оцінкою _____

Секретар ЕК _____
«__» _____ 2026 р.

Київ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ»

Факультет Інформатики
Кафедра Інформатики
Освітній ступінь Магістр
Спеціальність F2 Інженерія програмного забезпечення
Освітньо-наукова програма Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри інформатики
Кандидат фіз.-мат. наук
Нагірна А.М.
(підпис)
„___” _____ 2025 р.

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ/МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Майстер Іван Сергійович (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Технічні та прикладні аспекти створення цифрових двійників промислових підприємств. / Technical and Applied Aspects of Creating Digital Twins for Industrial Enterprises.

керівник роботи Кандидат технічних наук, доцент Савченко Тетяна Віталіївна

затверджені наказом вищого навчального закладу від «___» _____ 2025 року №___

2. Строк подання роботи студентом 25 травня 2026 року
3. План роботи Розробити систему цифрового двійника промислового підприємства для моніторингу, аналізу, прогнозування та оптимізації виробничих процесів на основі інтеграції даних із виробничого обладнання, використання технологій IoT, Big Data та методів машинного навчання, що дозволяє підвищити ефективність управління виробництвом. Проаналізувати сучасні підходи до створення та використання цифрових двійників у промислових системах, дослідити їх структуру, основні компоненти та технології збору й інтеграції виробничих даних. Провести аналіз існуючих платформ та програмних рішень для реалізації систем Digital Twin. Здійснити моделювання виробничих процесів як основи створення цифрового двійника та проаналізувати джерела даних підприємства і методи їх обробки. Формалізувати задачі моніторингу, прогнозування та оптимізації виробничих процесів, визначити функціональні та нефункціональні вимоги до системи та розробити її архітектуру. Реалізувати прототип системи цифрового двійника, що забезпечує збір і підготовку виробничих даних, побудову цифрової моделі процесів, прогнозування виробничих параметрів із використанням алгоритмів машинного навчання, оптимізацію режимів роботи та візуалізацію результатів. Оцінити ефективність розробленого прототипу з точки зору точності прогнозування та можливостей підвищення ефективності управління виробничими процесами.

Графік підготовки кваліфікаційної/магістерської роботи до захисту

Тема: «Технічні та прикладні аспекти створення цифрових двійників промислових підприємств»

Календарний план виконання роботи:

№ п/п	Назва етапу дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапу	Дата ознайомлення наукового керівника/Примітка
1.	Отримання завдання на дипломну роботу.	12.10.2025	13.10.2025
2.	Консультації по написанню роботи	11.11.2025	12.11.2025
3.	Огляд технічної літератури за темою роботи.	15.11.2025	16.11.2025
4.	Подати зміст роботи	25.11.2025	26.11.2025
5.	Подати календарний план виконання роботи та індивідуальне завдання	14.12.2025	15.12.2025
6.	Подати на перевірку перший розділ роботи	20.12.2025	21.12.2025
7.	Подати на перевірку другий розділ роботи	20.01.2026	21.01.2026
8.	Подати проміжний звіт про виконання роботи	31.01.2026	01.02.2026
9.	Розробка моделі цифрового двійника	10.02.2026	11.02.2026
10.	Подати на перевірку третій розділ роботи	20.02.2026	21.02.2026
11.	Завантажити чорнову версію роботи	01.04.2026	02.04.2026
12.	Аналіз отриманих результатів з керівником, написання доповіді та попередній захист	07.04.2026	08.04.2026
13.	Попередній захист магістерської роботи	28.04.2026	29.04.2026
14.	Корегування роботи за результатами попереднього захисту.	10.5.2026	11.5.2026
15.	Остаточне оформлення пояснювальної роботи та слайдів.	15.05.2026	16.05.2026
16.	Завантаження фінальної версії роботи	25.05.2026	26.05.2026
17.	Завантаження відгуку та рецензії	01.06.2026	02.06.2026
18.	Захист магістерської роботи (проекту)	Згідно з розкладом роботи ЕК	Згідно з розкладом роботи ЕК

Графік узгоджено : **“10” грудня 2025**

Науковий керівник : **Савченко Тетяна Віталіївна**

Виконавець кваліфікаційної роботи : **Майстер Іван Сергійович**

ЗМІСТ

<i>АНОТАЦІЯ</i>	5
<i>ABSTRACT</i>	6
<i>ВСТУП</i>	7
<i>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ</i>	10
1.1. Поняття та еволюція концепції Digital Twin у промисловості	10
1.2. Основні компоненти та структура цифрового двійника промислового підприємства	12
1.3. Технології збору та інтеграції даних у системах Digital Twin.....	15
1.4. Використання IoT, Big Data та хмарних технологій у створенні цифрових двійників	17
1.5. Аналіз сучасних платформ та рішень для реалізації Digital Twin.....	20
1.6. Висновки до розділу 1.....	23
<i>РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ПІДПРИЄМСТВА</i>	25
2.1. Моделювання виробничих процесів як основи для створення цифрового двійника	25
2.2. Аналіз джерел даних виробничого підприємства та методів їх обробки	29
2.3. Формалізація задач моніторингу, прогнозування та оптимізації виробничих процесів	32
2.4. Визначення функціональних та нефункціональних вимог до системи Digital Twin	35
2.5. Архітектура цифрової платформи управління цифровим двійником підприємства	38
2.6. Висновки до розділу 2.....	42
<i>РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТОТИПУ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ</i>	43
3.1. Загальна характеристика розробленого прототипу цифрового двійника.....	43
3.2. Рівень фізичних об'єктів та сенсорної інфраструктури системи	47
3.3. Реалізація підсистеми збору, передачі та підготовки даних.....	50
3.4. Побудова цифрової моделі виробничого процесу.....	54
3.5. Використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування параметрів виробництва	58
3.6. Оптимізація виробничих процесів на основі цифрового двійника	63
3.7. Інтерфейс користувача та візуалізація роботи цифрового двійника	65
3.8. Оцінка ефективності впровадження цифрового двійника на підприємстві.....	67
3.9 Висновки до розділу 3.....	70
<i>ВИСНОВКИ</i>	72
<i>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</i>	76
<i>ДОДАТКИ</i>	83

АНОТАЦІЯ

У даній магістерській роботі розглядаються технічні та прикладні аспекти створення цифрових двійників промислових підприємств. Розроблено архітектуру та концептуальну модель системи, що дозволяє здійснювати моніторинг, аналіз та оптимізацію виробничих процесів у режимі реального часу. В основі рішення лежить інтеграція даних із різномірних джерел – від виробничого обладнання (ЧПУ, датчиків) до корпоративних систем управління (ERP, MES). У роботі досліджено процес проектування 5-рівневої структури платформи, моделювання технологічних операцій на засадах гібридного підходу, а також застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування залишкового ресурсу обладнання (RUL). Окрему увагу приділено вибору технологічного стеку для обробки великих масивів даних та формалізації функціональних вимог до систем класу Digital Twin.

Ключові слова: цифровий двійник, промислове підприємство, IoT, Big Data, машинне навчання, архітектура програмного забезпечення, прогнозування (RUL), оптимізація виробництва.

ABSTRACT

In this master's thesis, the technical and applied aspects of creating digital twins for industrial enterprises are examined. An architecture and a conceptual model of the system have been developed, enabling real-time monitoring, analysis, and optimization of production processes. The proposed solution is based on the integration of data from heterogeneous sources, ranging from industrial equipment (CNC machines, sensors) to enterprise management systems (ERP, MES). The study investigates the design of a five-level platform architecture, modeling of technological operations using a hybrid approach, and the application of machine learning algorithms for predicting the remaining useful life (RUL) of equipment. Special attention is paid to the selection of the technological stack for processing large-scale data and to the formalization of functional requirements for Digital Twin systems.

Keywords: digital twin, industrial enterprise, IIoT, Big Data, machine learning, software architecture, remaining useful life (RUL), production optimization.

ВСТУП

Четверта промислова революція, яку дослідники нерідко характеризують як Industry 4.0, докорінно змінює підходи до організації виробничих процесів, управління підприємствами та прийняття інженерних рішень. Серед ключових технологій, що формують обличчя сучасної промисловості, особливе місце посідає концепція цифрових двійників – віртуальних моделей фізичних об'єктів, систем або процесів, що функціонують у режимі реального часу та здатні відображати поточний стан свого матеріального аналога з високим ступенем точності. Саме ця технологія стала предметом дослідження в межах представленої дипломної роботи.

Актуальність роботи. Стрімкий розвиток промислового Інтернету речей (IIoT), хмарних обчислень, великих даних та штучного інтелекту створив технологічне підґрунтя для масштабного впровадження цифрових двійників у реальному виробничому середовищі. Згідно з аналітичними оцінками провідних дослідницьких організацій, глобальний ринок цифрових двійників демонструє щорічне зростання понад 40%, а прогнозована вартість ринку до 2030 року може перевищити 150 млрд доларів США. Для українських промислових підприємств, які перебувають у процесі модернізації та цифрової трансформації, впровадження таких технологій є не лише питанням конкурентоспроможності, а й необхідною умовою інтеграції у глобальні ланцюги доданої вартості. Водночас теоретична база та методологічний інструментарій створення цифрових двійників для промислових підприємств залишаються недостатньо систематизованими, що зумовлює необхідність комплексного наукового дослідження цієї проблематики.

Аналіз сучасного стану проблеми. Фундаментальні засади концепції цифрових двійників були закладені Майклом Грівсом (Michael Grieves) у 2002 році в рамках концепції управління життєвим циклом продукту (PLM). Подальший розвиток теорії та практики цифрових двійників пов'язаний із дослідженнями Едварда Гріфора (Edward Glaesgen) та Девіда Старгела (David

Stargel), які обґрунтували застосування цієї технології в аерокосмічній галузі. Значний внесок у формування архітектурних підходів до побудови цифрових двійників зробили вчені Фей-Юе Вонг (Fei-Yue Wang), Манікам Панчалінгам (Manikavasagam Panchalingham) та група дослідників під керівництвом Томаса Ебнера (Thomas Ebner). Питання інтеграції технологій машинного навчання у системи цифрових двійників досліджували Аєша Алан (Ayesha Alan), Луїс Пуентес (Luis Puentes) та інші представники міжнародної наукової спільноти. Попри значну кількість наукових публікацій, комплексний аналіз технічних та прикладних аспектів саме для умов промислових підприємств із урахуванням сучасних вимог до кіберфізичних систем залишається недостатньо розробленим напрямом.

Проблема дослідження полягає у відсутності систематизованого підходу до проектування, розробки та впровадження цифрових двійників промислових підприємств, що враховував би як технічні вимоги до архітектури таких систем, так і прикладні аспекти їх інтеграції у реальні виробничі середовища з відповідним організаційним та інформаційним забезпеченням.

Мета дослідження – здійснити комплексний аналіз технічних та прикладних аспектів створення цифрових двійників промислових підприємств, визначити ключові архітектурні компоненти таких систем та розробити методичні рекомендації щодо їх практичного впровадження.

Об'єкт дослідження – процес створення та функціонування цифрових двійників промислових підприємств як інтегрованих кіберфізичних систем управління виробництвом.

Предмет дослідження – технічні рішення, архітектурні підходи, інструментальні засоби та прикладні методики, що застосовуються під час проектування і впровадження цифрових двійників у промисловому середовищі.

Завдання дослідження:

- дослідити теоретичні засади та еволюцію концепції цифрових двійників у промисловості;
- систематизувати наявні підходи до архітектурного проектування цифрових двійників промислових об'єктів;
- проаналізувати технологічний стек і програмно-апаратне забезпечення для реалізації цифрових двійників;
- визначити ключові виклики та бар'єри впровадження цифрових двійників на промислових підприємствах;
- розробити практичні рекомендації щодо поетапного впровадження цифрових двійників з урахуванням специфіки промислового виробництва;
- оцінити економічну ефективність та перспективи розвитку технологій цифрових двійників.

Практична значущість полягає у розробці конкретних рекомендацій щодо вибору технологічних платформ, архітектурних рішень та методів інтеграції цифрових двійників, які можуть бути застосовані на реальних промислових підприємствах у процесі цифрової трансформації.

Методи дослідження. У роботі використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів: аналіз і синтез наукової літератури, системний підхід до вивчення архітектур цифрових двійників, порівняльний аналіз технологічних платформ, методи моделювання та функціонального проектування систем, а також елементи техніко-економічного аналізу.

Структура роботи. Дипломна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1. Поняття та еволюція концепції Digital Twin у промисловості

Концепція цифрового двійника є однією з найбільш динамічно розвинутих технологічних парадигм сучасної промисловості. Попри відносну молодість самого терміна, ідея про необхідність створення точної віртуальної копії фізичного об'єкта для моніторингу, аналізу та управління його станом має значно глибше коріння в інженерній практиці. Розуміння генезису цієї концепції є принциповим для осмислення того, яким чином вона трансформувалась від теоретичної ідеї до повноцінного інструменту промислового управління.

Витоки концепції Digital Twin прийнято пов'язувати з роботами Майкла Грівса (Michael Grieves), який у 2002 році, виступаючи на конференції з управління життєвим циклом продукту (PLM), вперше описав модель, що передбачала наявність реального простору, де існує фізичний виріб, та віртуального простору, де існує його цифровий аналог, а також двосторонній потік даних між цими просторами [38]. Хоча термін «цифровий двійник» у той момент ще не набув поширення, саме ця тристороння модель – фізичний об'єкт, його віртуальна копія та зв'язок між ними – стала концептуальним ядром усіх подальших теоретичних розробок.

Практичне застосування ідеї цифрового моніторингу на основі динамічних моделей відбувалося паралельно у різних галузях. Зокрема, у 2010 році NASA офіційно включило концепцію Digital Twin до своєї технологічної дорожньої карти, розглядаючи її як засіб підвищення безпеки космічних апаратів за рахунок безперервного моніторингу їхнього стану через відповідні цифрові моделі. Цей крок став поворотним моментом у визнанні концепції на інституційному рівні [35].

Протягом 2010-х років технологія поступово переміщалась із суто аерокосмічної та оборонної сфери до широкого промислового застосування. Цьому сприяло насамперед поширення Інтернету речей (IoT), яке дозволило масово оснащувати промислове обладнання давачами та забезпечувати його постійне підключення до інформаційних систем. Разом із розвитком хмарних обчислювальних платформ та технологій обробки великих масивів даних це створило необхідну технологічну інфраструктуру для реалізації цифрових двійників на виробництві [42].

Паралельно з технологічним розвитком відбувалося й наукове осмислення концепції. Кританжер та колеги [38] запропонували класифікацію цифрових двійників у виробничому контексті, виділивши 3 базові рівні: цифровий двійник як цифровий прототип (digital twin prototype, DTP), цифровий двійник як цифровий екземпляр (digital twin instance, DTI) та цифровий двійник як агрегований об'єкт для аналізу (digital twin aggregate, DTA). Ця класифікація дозволила суттєво впорядкувати дискусію про природу та функції цифрових двійників у науковій спільноті.

Наступним важливим етапом стало формулювання «принципів Близнюків» (Gemini Principles) Центром цифрового будівництва Великобританії у 2018 році [26]. Цей документ визначив 9 ключових принципів, якими має керуватися розвиток національної системи цифрових двійників. Серед них - пріоритет суспільної вигоди, забезпечення відкритості та сумісності систем, надійність та безпека інформаційних потоків тощо. Це ознаменувало вихід концепції за межі суто технологічного дискурсу та її перетворення на об'єкт стратегічного планування на державному рівні.

До кінця 2010-х - початку 2020-х років відбулося суттєве розширення сфер застосування цифрових двійників: від окремих машин і агрегатів до цілих виробничих ліній, підприємств, міської інфраструктури та навіть урбаністичних систем. Дослідники Лу та ін. [42] зафіксували формування нової галузі досліджень – «розумного виробництва, керованого цифровими двійниками», де технологія використовується не лише для моніторингу, але й

для активного управління виробничими процесами в режимі реального часу. Еволюція концепції від описової до управлінської парадигми є принциповою характеристикою сучасного стану розвитку Digital Twin.

Таким чином, за понад 20 років від першого теоретичного формулювання концепція цифрового двійника пройшла шлях від абстрактної ідеї до зрілої технології, що застосовується у реальному виробничому середовищі. Цей шлях характеризувався поступовим розширенням технологічної бази, ускладненням функціональних можливостей та зміщенням акценту від пасивного відображення стану об'єкта до активного впливу на його функціонування.

1.2. Основні компоненти та структура цифрового двійника промислового підприємства

Розуміння архітектурної будови цифрового двійника є необхідним підґрунтям для будь-якої практичної роботи зі створення чи впровадження подібних систем. Структура цифрового двійника промислового підприємства значно складніша, ніж це може здаватися на перший погляд, і включає взаємопов'язані компоненти різних рівнів – від фізичних датчиків до аналітичних модулів, що функціонують на хмарних обчислювальних платформах.

Більшість сучасних дослідників виокремлюють у структурі цифрового двійника 3 фундаментальних рівні. Перший – фізичний рівень (Physical Entity), що є реальним об'єктом із усіма його характеристиками, параметрами та поведінкою. Другий – рівень з'єднання (Connection), що забезпечує передачу даних від фізичного об'єкта до його цифрового аналога та у зворотному напрямку. Третій – рівень цифрової моделі (Digital Twin), що є власне віртуальним відображенням фізичного об'єкта, наділеним здатністю до симуляції, аналізу та прогнозування [35].

Фізичний рівень у контексті промислового підприємства охоплює все матеріальне обладнання: верстати, двигуни, насоси, конвеєри, робототехнічні системи, а також будівлі та споруди. Принципово важливою складовою цього рівня є система збору даних – мережа давачів, що вимірюють температуру, тиск, вібрацію, швидкість, електричні параметри та інші характеристики, що відображають стан обладнання. Якість та щільність цієї сенсорної мережі безпосередньо визначають точність і повноту цифрової моделі.

Рівень з'єднання включає програмно-апаратні засоби передачі, попередньої обробки та маршрутизації даних. До цього рівня відносяться промислові шлюзи (industrial gateways), протоколи обміну даними (OPC-UA, MQTT, AMQP), системи крайових обчислень (edge computing) та мережеву інфраструктуру передачі даних. Саме на цьому рівні вирішуються питання надійності передачі, мінімізації затримок та первинної фільтрації даних.

Рівень цифрової моделі є найбільш складним та багатокomпонентним. Щеглов та Морозова [21] виділяють у ньому наступні функціональні підсистеми: модуль геометричного моделювання (що описує просторову конфігурацію об'єкта), фізичну модель (що описує поведінку об'єкта з точки зору фізичних законів), аналітичний модуль (що реалізує алгоритми обробки даних та машинного навчання), модуль прогнозування (що реалізує передбачення майбутнього стану) та модуль оптимізації (що генерує рекомендації щодо управління об'єктом).

Окрім цих 3 базових рівнів, сучасні дослідники виділяють також рівень сервісів (Service), який включає прикладні застосунки, що використовують дані та аналітику цифрового двійника для підтримки прийняття рішень. Це можуть бути системи моніторингу та сигналізації, застосунки для планування технічного обслуговування, рішення для управління якістю, оптимізатори виробничого розкладу тощо. Семененко [16] підкреслює, що саме наявність розвиненого сервісного рівня перетворює цифровий двійник із технологічної інновації на реальний інструмент управління ефективністю підприємства.

Важливим архітектурним рішенням є вибір між централізованою та децентралізованою організацією цифрового двійника. Централізована архітектура передбачає концентрацію всіх обчислювальних ресурсів та сховищ даних у єдиному центрі обробки (як правило, хмарній платформі). Децентралізована архітектура розподіляє обчислювальні ресурси між пристроями крайового рівня, локальними серверами та хмарною платформою, формуючи так звану туманну обчислювальну інфраструктуру (fog computing).

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика архітектурних підходів до побудови цифрового двійника

Параметр	Централізована архітектура	Децентралізована архітектура
Затримка обробки даних	Висока (50–200 мс)	Низька (1–10 мс)
Обчислювальна потужність	Необмежена (хмара)	Обмежена (edge/fog)
Стійкість до збоїв мережі	Низька	Висока
Вартість розгортання	Помірна	Висока
Масштабованість	Висока	Середня
Придатність для реального часу	Обмежена	Висока

Вибір архітектурного підходу повинен здійснюватися на основі аналізу вимог конкретного виробничого сценарію. Для систем, де критично важливою є мінімальна затримка реакції (наприклад, у системах автоматичного керування технологічним процесом), доцільним є децентралізований підхід із розміщенням значної частини обчислювальних ресурсів на крайовому рівні. Для систем, орієнтованих переважно на аналітику та прогнозування, централізована хмарна архітектура може виявитися оптимальнішою. Абайадіра та Ганегода [22] зазначають, що більшість успішних промислових впроваджень використовують гібридну архітектуру, що поєднує переваги обох підходів.

1.3. Технології збору та інтеграції даних у системах Digital Twin

Якість та повнота даних є фундаментальною умовою ефективного функціонування цифрового двійника. Система збору та інтеграції даних є, по суті, нервовою системою цифрового двійника – без неї навіть найдосконаліша модель залишатиметься статичною копією, а не живим відображенням реального об'єкта. Технологічна складність цього компонента часто недооцінюється на початкових стадіях проектування, що призводить до суттєвих проблем під час впровадження.

Первинним джерелом даних для цифрового двійника промислового підприємства є мережа давачів та вимірювальних пристроїв, розміщених на фізичному обладнанні. Сучасні промислові давачі охоплюють широкий спектр фізичних та хімічних параметрів: температуру, тиск, витрату, рівень, вібрацію, акустичну емісію, положення, швидкість обертання, електричні характеристики, хімічний склад середовищ тощо. Для прикладу, сучасний прокатний стан може бути оснащений тисячами давачів, що генерують від кількох до кількох сотень гігабайт даних щодня [42].

Проте збір первинних сигналів від давачів є лише першою ланкою складного технологічного ланцюга обробки та інтеграції даних. Наступним елементом є промисловий контролер або програмований логічний контролер (PLC), що здійснює первинну обробку сигналів та забезпечує управління в реальному часі. Паралельно функціонують системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), що забезпечують збір, відображення та архівування технологічних параметрів у масштабах цеху або підприємства.

Критичним моментом є інтеграція даних із різномірних джерел та систем. Промислові підприємства, особливо ті, що функціонують тривалий час, як правило, використовують обладнання різних виробників та різних поколінь, що застосовують несумісні протоколи обміну даними та стандарти передачі. Ця гетерогенність є одним із головних практичних викликів при побудові цифрового двійника. Для вирішення цієї проблеми застосовуються

промислові шлюзи (industrial gateways) та протоколи-посередники, що забезпечують уніфіковану передачу даних від різнорідних систем [30].

Серед промислових протоколів передачі даних провідне місце займає OPC-UA (OPC Unified Architecture), який є відкритим, незалежним від виробника стандартом обміну даними між промисловими пристроями та програмними системами. OPC-UA забезпечує не лише передачу значень параметрів, але й семантичний опис даних, що суттєво спрощує їх автоматизовану обробку та інтеграцію. Для передачі даних від IoT-пристроїв широко застосовується протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), що характеризується низьким споживанням ресурсів та надійністю передачі навіть за умов нестабільного зв'язку.

Важливим напрямком розвитку технологій збору даних є edge computing – концепція, що передбачає розміщення обчислювальних ресурсів безпосередньо на рівні виробничого обладнання або поблизу нього. Це дозволяє здійснювати первинну обробку та фільтрацію даних там, де вони виникають, зменшуючи обсяг трафіку та затримку передачі до центральних систем. Калайда та Пан [6] підкреслюють, що для систем із жорсткими вимогами до реакції в реальному часі edge computing є не опцією, а необхідністю.

Окремою проблемою є забезпечення якості даних. Промислові давачі можуть надавати помилкові показники внаслідок відмов, пошкоджень, дрейфу характеристик або електромагнітних перешкод. Для виявлення та виправлення аномалій у потоці даних застосовуються алгоритми фільтрації, методи статистичного контролю якості та, все частіше, методи машинного навчання, що здатні виявляти нетипові патерни в даних та відрізняти реальні відхилення від параметрів технологічного процесу від артефактів вимірювання.

Таблиця 1.2

Порівняльний аналіз протоколів передачі даних для систем Digital Twin

Протокол	Рівень застосування	Семантика	Безпека	Масштабованість
OPC-UA	Промислові мережі	Повна	Висока	Висока
MQTT	IoT, телеметрія	Мінімальна	Середня	Дуже висока
AMQP	Корпоративні системи	Середня	Висока	Висока
Modbus	Польовий рівень	Відсутня	Відсутня	Низька
PROFINET	Автоматизація	Часткова	Середня	Середня
CoAP	Ресурсообмежені пристрої	Мінімальна	Середня	Висока

Крім технологічних даних від виробничого обладнання, цифровий двійник промислового підприємства може інтегрувати дані з корпоративних інформаційних систем: ERP (Enterprise Resource Planning), MES (Manufacturing Execution System), системи управління якістю, системи управління технічним обслуговуванням тощо. Таке збагачення даних дозволяє значно розширити аналітичні можливості системи та забезпечити комплексне уявлення про стан підприємства, що охоплює не лише фізичні параметри обладнання, але й операційні та бізнес-показники.

1.4. Використання IoT, Big Data та хмарних технологій у створенні цифрових двійників

Три технологічних напрями - промисловий Інтернет речей (IIoT), великі дані (Big Data) та хмарні обчислення - утворюють нерозривну технологічну тріаду, без якої реалізація повноцінного цифрового двійника промислового підприємства сьогодні практично неможлива. Кожна з цих технологій вирішує певну критичну функціональну задачу, і разом вони формують ту інфраструктурну основу, на якій функціонує цифровий двійник.

Промисловий Інтернет речей є технологічним фундаментом, що забезпечує підключення фізичних об'єктів до інформаційних систем. IIoT відрізняється від споживчого IoT більш суворими вимогами до надійності, детермінованості та безпеки. Промислові IIoT-пристрої повинні витримувати агресивне виробниче середовище (вібрацію, температурні перепади, хімічний

вплив), забезпечувати передбачувану поведінку у критичних ситуаціях та відповідати вимогам промислових стандартів безпеки. Вишневський [3] зазначає, що масове впровадження ПоТ на промислових підприємствах України стикається зі значними бар'єрами, пов'язаними з несумісністю нового обладнання зі застарілою виробничою інфраструктурою.

Концептуально важливим є розуміння того, що ПоТ не лише забезпечує збір даних, але й відкриває можливість для зворотного впливу - передачі управляючих сигналів від цифрового двійника до фізичного об'єкта. Саме ця двонаправленість перетворює систему з пасивного інструменту моніторингу на активний засіб управління. У повноцінних реалізаціях цифровий двійник здатен автономно або напівавтономно коригувати параметри технологічного процесу на підставі результатів моніторингу та аналітики.

Технологія Big Data є відповіддю на проблему, що виникає при масштавному застосуванні ПоТ: обсяги даних, що генеруються сенсорними мережами промислового підприємства, можуть виявитися надто великими для обробки традиційними реляційними базами даних. Промислові підприємства з розвинутою IoT-інфраструктурою здатні генерувати терабайти даних щодня. Технології Big Data - зокрема, розподілені обчислювальні платформи Apache Hadoop та Apache Spark, потокові системи обробки даних Apache Kafka та Apache Flink - дозволяють опрацьовувати ці масиви в масштабі реального часу або близькому до реального часу [35].

Важливим аспектом є розрізнення між пакетною (batch) та потоковою (streaming) обробкою даних у контексті цифрових двійників. Пакетна обробка передбачає накопичення певного обсягу даних і їхню подальшу сумісну обробку – це підходить для побудови аналітичних звітів, навчання моделей машинного навчання та виявлення довгострокових трендів. Потокова обробка здійснюється безперервно у міру надходження нових даних – це необхідно для моніторингу та своєчасного реагування на відхилення. Ефективна система цифрового двійника, як правило, використовує обидва підходи у поєднанні.

Хмарні обчислення забезпечують масштабовану обчислювальну інфраструктуру для зберігання, обробки та аналізу великих обсягів даних без необхідності будувати власний дорогий дата-центр. Провідні хмарні платформи – Microsoft Azure, Amazon Web Services (AWS), Google Cloud Platform – пропонують спеціалізовані сервіси для роботи з IoT-даними та реалізації цифрових двійників: Azure IoT Hub, AWS IoT Core, Google Cloud IoT Core. Ці сервіси забезпечують захищене підключення тисяч та мільйонів IoT-пристроїв, масштабовану обробку потоків даних та готові аналітичні інструменти. Калайда та Пан [6] детально досліджують архітектуру цифрового двійника розумних будівель на базі платформи Azure Digital Twins, демонструючи практичні переваги хмарного підходу.

Таблиця 1.3

Порівняльний огляд хмарних платформ для реалізації Digital Twin

Хмарна платформа	IoT-сервіс	DT-сервіс	СУБД	ML/AI інструменти
Microsoft Azure	Azure IoT Hub	Azure Digital Twins	Cosmos DB, SQL	Azure ML, Cognitive Services
Amazon AWS	AWS IoT Core	AWS IoT TwinMaker	DynamoDB, RDS	SageMaker
Google Cloud	Cloud IoT Core	(екосистема)	Bigtable, BigQuery	Vertex AI
IBM Cloud	Watson IoT	(Watson екосистема)	Cloudant, Db2	Watson Studio
Siemens Xcelerator	MindSphere	Industrial Edge	(власні)	AI Inference Server

Технологія штучного інтелекту та машинного навчання відіграє дедалі важливішу роль у цифрових двійниках промислових підприємств. Алгоритми машинного навчання застосовуються для виявлення аномалій у потоках даних, прогнозування залишкового ресурсу обладнання (predictive maintenance), оптимізації параметрів технологічних процесів та розпізнавання дефектів продукції. Семененко [16] розглядає моделювання цифрових двійників бізнес-процесів як інструмент управління ефективністю компанії, підкреслюючи синергетичний ефект від поєднання можливостей Big Data та алгоритмів

аналітики. Слід зазначити, що ефективне застосування методів машинного навчання потребує значних обсягів якісних навчальних даних та відповідної обчислювальної потужності, що додатково підвищує значення хмарних технологій у системах цифрових двійників.

1.5. Аналіз сучасних платформ та рішень для реалізації Digital Twin

Ринок програмних платформ та рішень для реалізації цифрових двійників промислових підприємств є динамічним і швидко розвивається. Великі виробники промислового програмного забезпечення та технологічні гіганти інвестують значні ресурси у розвиток спеціалізованих рішень, а стартап-екосистема активно пропонує нові нішові продукти. Аналіз наявних платформ є важливим практичним завданням для підприємств, що стоять перед вибором технологічного стеку для реалізації власного цифрового двійника.

Серед найбільш впливових гравців ринку виділяється Siemens, чия платформа Xcelerator об'єднує широкий спектр інструментів для проектування, симуляції та управління цифровими двійниками. Пакет Siemens Teamcenter забезпечує управління даними про виріб упродовж усього його життєвого циклу, інструменти серії Simcenter – мультифізичне моделювання та симуляцію, а платформа MindSphere – хмарне підключення та аналітику промислових даних. За даними компанії, застосування її рішень у реальних проектах дозволяло скорочувати час виведення нових продуктів на ринок більш ніж на 40% [40].

PTC ThingWorx є однією з перших і найбільш зрілих платформ Industrial IoT, що забезпечує швидке підключення промислових пристроїв та розробку прикладних IoT-застосунків. Інструменти Vuforia від PTC додають можливості доповненої реальності (AR), що дозволяє операторам безпосередньо на виробничому майданчику отримувати інформацію від цифрового двійника, накладаючи її на реальний вигляд обладнання. Це

суттєво спрощує процедури технічного обслуговування та навчання персоналу.

ANSYS Twin Builder є спеціалізованим рішенням для побудови симуляційних цифрових двійників на основі фізичних моделей. Платформа дозволяє створювати детальні мультифізичні моделі обладнання, що поєднують механічну, термічну, гідравлічну та електромагнітну складові. Особливою перевагою є можливість автоматизованого зменшення складності (model order reduction), що дозволяє конвертувати детальні розрахункові моделі у спрощені, але точні ROM-моделі (Reduced Order Models), придатні для роботи в реальному часі.

Платформа Microsoft Azure Digital Twins пропонує хмарний підхід до побудови просторових графів цифрових двійників, де фізичні та логічні взаємозв'язки між об'єктами описуються за допомогою мови DTDL (Digital Twins Definition Language). Це дозволяє будувати ієрархічні та мережеві моделі складних систем, що включають не лише обладнання, але й простори, потоки матеріалів та організаційні структури. Калайда та Пан [6] демонструють практичне застосування цієї платформи для моніторингу та управління будівлями.

Серед відкритих рішень (open-source) слід відзначити Eclipse Ditto – платформу для побудови цифрових двійників пристроїв, розроблену та підтримувану фондом Eclipse. Eclipse Ditto надає RESTful API для управління цифровими двійниками, механізми підписки на зміни стану та гнучку модель авторизації. Ця платформа є привабливою для підприємств, що прагнуть уникнути залежності від комерційних постачальників та мають достатню внутрішню компетенцію для розробки та обслуговування власних рішень.

Таблиця 1.4

Порівняльний аналіз провідних платформ для реалізації Digital Twin

Платформа	Виробник	Тип ліцензії	Основна галузь	Інтеграція з хмарою	Підтримка фізичних моделей
Xcelerator / MindSphere	Siemens	Комерційна	Машинобудування	Власна хмара	Повна
ThingWorx	PTC	Комерційна	Широкий спектр	Azure, AWS	Часткова
ANSYS Twin Builder	ANSYS	Комерційна	Важка промисловість	Azure, AWS	Повна
Azure Digital Twins	Microsoft	Хмарна SaaS	Широкий спектр	Azure	Обмежена
AWS IoT TwinMaker	Amazon	Хмарна SaaS	Широкий спектр	AWS	Обмежена
Eclipse Ditto	Eclipse Foundation	Open-source	IoT/пристрої	Будь-яка	Відсутня
AVEVA E3D / PI	AVEVA	Комерційна	Нафта/газ, енергетика	Власна хмара	Часткова

Вибір платформи для реалізації цифрового двійника є стратегічним рішенням, що визначає не лише технічні можливості системи, але й тривалі комерційні відносини з постачальником. Бояринова та Саченко [2] зазначають, що при виборі платформи цифрової трансформації промислові підприємства повинні враховувати не лише функціональні характеристики, але й перспективи розвитку постачальника, наявність локальної підтримки та відповідність платформи стратегічним напрямкам цифровізації підприємства. Окремої уваги заслуговує питання інтероперабельності - здатності обраної платформи взаємодіяти з іншими системами та платформами, що є критично важливим в умовах гетерогенної IT-інфраструктури реального підприємства [30].

Фуллер та ін. [35] звертають увагу на важливість стандартизації у сфері цифрових двійників. Відсутність загальновизнаних стандартів обміну даними та описів моделей ускладнює інтеграцію рішень різних постачальників та міграцію між платформами. Промислові консорціуми та стандартизаційні організації, зокрема ISO та Industrial Internet Consortium (IIC), активно працюють над розробкою відповідних стандартів, проте цей процес ще

далекий від завершення. Острівська та Островський [12] наголошують, що для українських промислових підприємств при виборі платформ важливо орієнтуватися на рішення, що підтримують відкриті стандарти та забезпечують незалежність від монопольного постачальника.

1.6. Висновки до розділу 1

У першому розділі дипломної роботи здійснено комплексний теоретичний аналіз концепції цифрових двійників промислових підприємств, що дозволив встановити низку важливих висновків.

Концепція Digital Twin пройшла значний еволюційний шлях від абстрактної теоретичної ідеї, сформульованої Майклом Грівсом у 2002 році, до зрілої промислової технології, що широко застосовується у реальному виробничому середовищі. Ключовим рушієм цього переходу стало конвергентне поширення IoT, Big Data та хмарних обчислень, що сформувало необхідну технологічну екосистему для реалізації концепції.

Цифровий двійник промислового підприємства є складною багаторівневою системою, що включає фізичний рівень збору даних, рівень передачі та інтеграції даних, рівень цифрової моделі та рівень прикладних сервісів. Якість та повнота кожного з цих рівнів безпосередньо визначає загальну ефективність системи.

Технології збору та інтеграції даних є критично важливим, але часто недооціненим компонентом системи. Гетерогенність промислового обладнання та протоколів передачі даних є одним із головних практичних викликів при побудові цифрового двійника реального підприємства.

Ринок платформ для реалізації цифрових двійників є різноманітним та швидко розвивається. Вибір платформи є стратегічним рішенням, що має враховувати не лише технічні характеристики, але й відповідність стратегії цифрової трансформації підприємства та вимогам інтероперабельності.

Сукупність отриманих теоретичних узагальнень формує необхідне підґрунтя для подальшого дослідження технічних та прикладних аспектів створення цифрових двійників у наступних розділах дипломної роботи.

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ПІДПРИЄМСТВА

2.1. Моделювання виробничих процесів як основи для створення цифрового двійника

Побудова цифрового двійника промислового підприємства починається не з вибору технологічного стеку та не з налаштування програмного забезпечення, а з ретельного формалізованого опису тих виробничих процесів, які цей двійник має відображати. Моделювання виробничих процесів є концептуальним фундаментом усієї подальшої роботи: без адекватного розуміння та опису того, як функціонує реальне виробництво, жодна технічна архітектура не зможе забезпечити значущих результатів.



Рис. 2.1 – Приклади використання цифрових двійників

Для цілей цифрового двійника виробничий процес розглядається як система взаємопов'язаних перетворень, що трансформують вхідні матеріальні

та енергетичні потоки у готовий продукт із заданими характеристиками. Кожне таке перетворення описується набором керованих параметрів (наприклад, температура нагрівання, швидкість обертання шпинделя, тиск пресування), що піддаються управлінню, та вимірюваних характеристик виходу (розміри, маса, твердість, шорсткість поверхні), що характеризують результат. Встановлення функціональних залежностей між параметрами процесу та характеристиками виходу є, по суті, побудовою математичної моделі виробництва [42].

На практиці застосовуються 3 принципово різні підходи до моделювання виробничих процесів. Перший – детерміновані фізичні моделі, що ґрунтуються на законах фізики, хімії та механіки та описують поведінку процесу через систему диференціальних рівнянь або рівнянь стану. Ці моделі є найточнішими при правильному визначенні, але їх розробка вимагає глибокої предметної експертизи та може бути надзвичайно трудомісткою для складних мультифізичних процесів. Другий підхід – статистичні та регресійні моделі, що не спираються на фізичний опис процесу, а встановлюють кореляційні залежності між вхідними та вихідними параметрами на основі реальних виробничих даних. Третій підхід – гібридні моделі, що поєднують елементи фізичного моделювання зі статистичними методами, дозволяючи використовувати фізичні обмеження для підвищення точності та екстраполяційних можливостей статистичних моделей [35].

Як практичний приклад розглянемо типове машинобудівне підприємство, що здійснює механічну обробку металевих деталей. Виробничий процес складається з таких основних операцій: підготовка заготовки, токарна обробка, фрезерування, свердлення, термічна обробка, шліфування та контроль якості. Кожна з цих операцій характеризується власним набором параметрів. Наприклад, операція токарної обробки описується швидкістю різання (від 50 до 300 м/хв залежно від матеріалу), подачею (0,05–0,5 мм/об), глибиною різання (0,1–5,0 мм), стійкістю різального інструменту та вимірюваними характеристиками результату – розмірною

точністю (досягнутим квалітетом) та шорсткістю поверхні (R_a від 0,2 до 6,3 мкм).

Для формалізації виробничих процесів у контексті цифрового двійника широко застосовується нотація BPMN (Business Process Model and Notation), що дозволяє графічно описувати послідовності дій, точки прийняття рішень та паралельні потоки. Проте для виробничих систем, де важливі не лише послідовності операцій, але й фізичні параметри та стани, BPMN зазвичай доповнюється більш спеціалізованими засобами – наприклад, мовою моделювання Modelica або стандартами серії ISA-88/ISA-95 для опису виробничих рецептур та ієрархій управління.

Таблиця 2.1

Порівняльний аналіз підходів до моделювання виробничих процесів
для цифрового двійника

Підхід до моделювання	Основа	Точність	Потреба в даних	Трудомісткість розробки	Придатність для ЦД
Фізична модель (white-box)	Закони фізики	Висока	Мала	Дуже висока	Висока
Регресійна модель (black-box)	Статистика	Середня	Велика	Низька	Середня
Гібридна модель (grey-box)	Фізика + статистика	Висока	Середня	Висока	Дуже висока
Агентна модель	Поведінкові правила	Середня	Мала	Середня	Середня
Імітаційна модель (DES)	Дискретні події	Середня	Середня	Середня	Висока

Важливим практичним аспектом моделювання є визначення меж моделі – вирішення питання про те, які елементи виробничого процесу підлягають детальному моделюванню, а які можуть бути спрощені або взагалі винесені за межі моделі. Надмірна деталізація призводить до неприйнятної обчислювальної складності та ускладнює підтримку моделі в актуальному стані; недостатня деталізація знижує точність прогнозів та управлінські

можливості системи. Оптимальний рівень деталізації визначається виходячи з поставлених завдань та наявних ресурсів [16].

Окремою задачею є верифікація та валідація розроблених моделей. Верифікація - перевірка того, чи правильно реалізована модель відповідно до свого опису. Валідація – перевірка того, чи адекватно модель відображає реальний процес. Для валідації порівнюють результати симуляції моделі з реальними вимірюваннями на виробництві; відхилення понад 5% за ключовими параметрами, як правило, вважається неприйнятним для систем управління виробництвом і потребує уточнення структури або параметрів моделі.

Таблиця 2.2

Характеристика параметрів операції токарної обробки для моделі
цифрового двійника

Параметр операції	Діапазон значень	Одиниця вимірювання	Метод вимірювання	Похибка вимірювання
Швидкість різання	50–300	м/хв	Тахометр	±0,5%
Подача	0,05–0,50	мм/об	Енкодер	±0,01 мм/об
Глибина різання	0,1–5,0	мм	Лінійний давач	±0,005 мм
Температура зони різання	200–900	°C	Термопара, IR	±5 °C
Шорсткість поверхні Ra	0,2–6,3	мкм	Профілометр	±0,05 мкм
Стійкість інструменту	10–120	хв	Хронометр + вимір	±1 хв

Завершення етапу моделювання виробничих процесів є необхідною передумовою для переходу до наступних етапів проектування системи цифрового двійника. Якість сформованих моделей безпосередньо визначає якість прогнозів та управлінських рекомендацій, що генерує система в ході експлуатації.

2.2. Аналіз джерел даних виробничого підприємства та методів їх обробки

Реальне промислове підприємство є складним багатошаровим джерелом даних, де різні інформаційні системи генерують потоки даних різної природи, частоти та формату. Комплексний аналіз цих джерел є необхідним кроком для проектування ефективної архітектури збору та обробки даних у системі цифрового двійника. Некоректне або неповне визначення джерел даних на етапі проектування обертається значними труднощами та витратами під час впровадження.

Для аналізу джерел даних скористаємося типовою структурою промислового підприємства машинобудівного профілю, яке має: виробничі потужності загальною площею близько 15 000 м², 120 одиниць технологічного обладнання, 3 виробничих цехи (заготівельний, механічний, складальний), допоміжні служби та корпоративну IT-інфраструктуру. Підприємство такого масштабу є типовим для середнього машинобудівного виробництва і дозволяє проілюструвати характерну складність задачі інтеграції даних.

Перший та найбільший за обсягом клас джерел – технологічне обладнання та його автоматизовані системи управління. Верстати з ЧПУ генерують дані про режими різання, позиції осей, навантаження шпинделя, коди програм та діагностичні повідомлення. Частота дискретизації для критичних параметрів може становити 1–10 кГц (вібрація шпинделя), тоді як для менш динамічних параметрів (температура корпусу, рівень охолоджувальної рідини) достатньо дискретизації 1 раз на 1–5 с. З 120 одиниць обладнання підприємства, що розглядається, лише близько 40% має сучасні цифрові інтерфейси (Ethernet, OPC-UA), тоді як решта оснащена застарілими інтерфейсами (RS-232, RS-485, Modbus RTU) або взагалі не має засобів дистанційного зчитування даних, що є цілком типовою ситуацією для реального виробництва [3].

Другий клас джерел – системи автоматизації будівель та виробничої інфраструктури. До них відносяться: система моніторингу споживання електроенергії (дані про потужність кожного споживача з дискретизацією 1 раз на 15 хв або 1 раз на 1 хв), система вентиляції та кондиціонування (температура та вологість у приміщеннях, стан фільтрів, витрата повітря), система освітлення, системи виявлення пожежі та газового аналізу. Хімічний моніторинг та ін. Ці дані важливі для оцінки операційних витрат та дотримання умов технологічного процесу [13].

Третій клас – корпоративні інформаційні системи. Система ERP (Enterprise Resource Planning) містить дані про виробничі замовлення, планові строки виконання, наявність матеріалів на складах, дані про постачальників і споживачів, фінансові показники. Система MES (Manufacturing Execution System), якщо вона є впроваджена, містить оперативні дані про виконання виробничих завдань, фактичні часи операцій, відхилення від технологічного процесу. Система управління технічним обслуговуванням (CMMS) містить дані про планові та виконані регламентні роботи, замовлення на ремонт, запасні частини та матеріали для ТО, фактичні дати відмов обладнання. Система управління якістю містить результати входного, операційного та вихідного контролю, рекламації споживачів, дані про браковану продукцію [2].

Слід окремо відзначити проблему часової синхронізації даних із різних джерел. Різні системи підприємства можуть вести власний облік часу, що призводить до розбіжностей у часових мітках на рівні від кількох мілісекунд до кількох секунд або навіть хвилин. При об'єднанні потоків даних від різних джерел для потреб цифрового двійника ці розбіжності можуть призводити до некоректних кореляцій та хибних висновків. Забезпечення єдиного часу в усіх системах підприємства (наприклад, через протокол RTP – Precision Time Protocol) є важливим практичним завданням при підготовці до впровадження цифрового двійника [21].

Таблиця 2.3

Характеристика джерел даних типового машинобудівного
підприємства

Джерело даних	Тип даних	Частота оновлення	Обсяг/добу	Формат	Інтерфейс
Верстати з ЧПУ	Технологічні параметри	100 мс – 1 с	~50 ГБ	Бінарний/XML	OPC-UA, Fanuc FOCAS
Давачі вібрації	Вібросигнали	1–10 кГц	~200 ГБ	Бінарний	Industrial Ethernet
Система SCADA	Зведені параметри	1–5 с	~5 ГБ	OPC-DA/UA	OPC-UA
ERP-система	Бізнес-дані	1 раз/хв – 1 раз/год	~1 ГБ	XML/JSON	REST API
CMMS	Дані ТО	1 раз/год – 1 раз/добу	~100 МБ	XML/JSON	REST API
Система якості	Результати вимірювань	1 раз/хв – 1 раз/год	~500 МБ	CSV/JSON	REST API
Лічильники енергії	Споживання	1 раз/15 хв	~10 МБ	Modbus/M-Bus	RS-485

Після збору даних їхня обробка передбачає кілька послідовних етапів. Первинна обробка включає фільтрацію шуму (застосування медіанних, ковзних середніх або вейвлет-фільтрів), виявлення та усунення викидів (методи на основі міжквартильного розмаху або Z-оцінок), відновлення пропущених значень (лінійна інтерполяція, метод k найближчих сусідів або складніші методи на основі машинного навчання), а також нормалізацію та стандартизацію значень для забезпечення сумісності при спільному аналізі [22].

Таблиця 2.4

Методи обробки виробничих даних у системі цифрового двійника

Задача обробки даних	Метод	Застосовність	Складність реалізації	Обчислювальні витрати
Фільтрація шуму	Ковзне середнє, медіанний фільтр	Числові часові ряди	Низька	Мінімальні
Виявлення викидів	Z-оцінка, IQR, Isolation Forest	Числові дані	Середня	Помірні
Відновлення пропусків	Лінійна інтерполяція, kNN	Часові ряди	Низька	Помірні

Зменшення розмірності	PCA, t-SNE, UMAP	Багатовимірні дані	Висока	Значні
Виявлення аномалій	Autoencoder, LSTM-AD	Потокові дані	Висока	Значні
Прогнозування	ARIMA, LSTM, XGBoost	Часові ряди	Висока	Значні

Особливого значення набуває проблема обробки даних у режимі реального часу, де традиційні пакетні підходи є неприйнятними через їхню затримку. Для потокової обробки даних у контексті цифрових двійників застосовуються технології Apache Kafka (для організації потоків повідомлень), Apache Flink та Spark Streaming (для їхньої обробки), а також часові бази даних - InfluxDB, TimescaleDB – оптимізовані для ефективного зберігання та запиту часових рядів.

2.3. Формалізація задач моніторингу, прогнозування та оптимізації виробничих процесів

Після того як виробничі процеси описані у вигляді моделей, а джерела даних ідентифіковані та охарактеризовані, наступним кроком є формалізація конкретних задач, для вирішення яких і будується система цифрового двійника. Чітка постановка задач є критично важливою, оскільки визначає вимоги до математичного апарату, обчислювальних ресурсів та інтерфейсів взаємодії з користувачами.

Задача моніторингу є базовою та передбачає безперервне відстеження стану виробничих процесів та обладнання з метою виявлення відхилень від норми та своєчасного сповіщення відповідальних осіб. З математичної точки зору моніторинг зводиться до порівняння поточних значень ключових параметрів із заданими границями допустимих відхилень та з відповідними значеннями цифрової моделі, яка відображає «нормальний» стан системи. При цьому важливо розрізняти 2 типи відхилень: порушення технологічних меж (коли параметр виходить за встановлений допустимий діапазон) та

статистично значущі відхилення від типової поведінки (коли значення формально перебуває в допустимих межах, але демонструє аномальний тренд або характер коливань).

Для формалізації задачі моніторингу промислового обладнання широко застосовується підхід на основі індексів технічного стану (Health Index). Для кожної одиниці обладнання або системи визначається набір параметрів, що характеризують її стан, та правила їх агрегування в єдиний індекс від 0 (повна відмова) до 100% (ідеальний стан). Щеглов та Морозова [21] описують методологію розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем промислового Інтернету речей, де саме концепція комплексного індексу стану є центральною.

Задача прогнозування в системі цифрового двійника може бути формалізована у 2 основних різновидах. Перший - прогнозування залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL) обладнання, тобто визначення того, через який час та з якою ймовірністю відбудеться відмова або значне погіршення стану конкретного вузла чи агрегату. Другий різновид – прогнозування параметрів виробничого процесу та якості продукції на основі поточних технологічних параметрів. Математично обидві задачі є задачами регресії або класифікації і можуть вирішуватися як традиційними статистичними методами (авторегресійні моделі ARIMA, векторні авторегресійні моделі VAR), так і методами машинного навчання (градієнтний бустинг XGBoost, рекурентні нейронні мережі LSTM) [35].

Для конкретного прикладу – прогнозування залишкового ресурсу підшипників шпинделя фрезерного верстата – задача RUL може бути сформульована так: маючи часовий ряд сигналу вібрації підшипника за останні N годин роботи (де N є параметром моделі, що підбирається на основі даних), передбачити, через скільки годин до певного граничного рівня вібрації (наприклад, 10 мм/с за стандартом ISO 10816) амплітуда коливань досягне критичного значення. Досвід промислових впроваджень свідчить, що для підшипників типових верстатів точність таких прогнозів за горизонт 48–72 год

з використанням LSTM-мереж становить 75–85%, що є достатнім для практичного планування технічного обслуговування.

Таблиця 2.5

Формалізація основних задач системи цифрового двійника

Задача	Математична форма	Алгоритми	Горизонт прогнозу	Метрика якості
Моніторинг стану	Виявлення аномалій	Isolation Forest, Autoencoder	Реальний час	F1-score, Precision/Recall
Прогноз RUL	Регресія	LSTM, XGBoost, ARIMA	24–168 год	RMSE, MAE
Прогноз якості	Класифікація/регресія	Random Forest, SVM	Поточна партія	Accuracy, RMSE
Оптимізація режимів	Задача оптимізації	RL, GA, PSO	Реальний час	Цільова функція
Планування ТО	Планування	Евристики, LP	1–4 тижні	Вартість простоїв

Задача оптимізації є найбільш складною з точки зору математичного апарату та обчислювальних вимог. У загальному вигляді задача оптимізації виробничого процесу формулюється як мінімізація (або максимізація) цільової функції за умови виконання набору технологічних та ресурсних обмежень. Цільовою функцією може слугувати собівартість одиниці продукції, загальна продуктивність виробничої лінії, питоме енергоспоживання, відсоток браку або будь-яка їх зважена комбінація. Обмеженнями є технологічні вимоги до якості продукції, пропускна здатність виробничого обладнання, норми витрати матеріалів та енергії, техніка безпеки тощо [42].

Таблиця 2.6

Порівняльний аналіз методів оптимізації для задач цифрового двійника

Метод оптимізації	Тип задачі	Обчислювальна складність	Глобальний оптимум	Практичне застосування
Лінійне програмування (LP)	Лінійна	Поліноміальна	Гарантовано	Планування виробництва

Змішано-цілочисельне (MIP)	Комбінаторна	Експоненційна	Не гарантовано	Розкрій, розклади
Генетичні алгоритми (GA)	Будь-який тип	Висока	Евристично	Оптимізація режимів
Рой частинок (PSO)	Неперервна	Висока	Евристично	Режими обробки
Навчання з підкріпленням (RL)	Динамічна	Дуже висока	Не гарантовано	Адаптивне управління
Байєсівська оптимізація	Неперервна	Помірна	Наближено	Підбір параметрів

Важливим практичним аспектом є координація між задачами різного рівня – між оперативною оптимізацією режимів обробки в реальному часі, середньостроковим плануванням технічного обслуговування та довгостроковим оперативно-стратегічним плануванням виробництва. Ефективний цифровий двійник повинен підтримувати всі ці горизонти прийняття рішень, забезпечуючи узгодженість між ними.

2.4. Визначення функціональних та нефункціональних вимог до системи Digital Twin

Проектування системи Digital Twin промислового підприємства, як і будь-якої іншої складної інформаційної системи, починається з чіткого визначення вимог. Від якості формулювання вимог залежить не лише успішність технічної реалізації, але й відповідність створеної системи реальним потребам підприємства. Практика показує, що більшість проектів цифрової трансформації, що зазнають невдачі, роблять це саме через неадекватне визначення вимог на початковому етапі, а не через технічні проблеми реалізації [34].

Функціональні вимоги описують те, що система повинна робити, тобто конкретні функції та можливості, які вона повинна надавати користувачам. Для системи цифрового двійника машинобудівного підприємства, що розглядається, функціональні вимоги можуть бути згруповані за доменами.

Домен моніторингу охоплює: відображення в реальному часі поточного стану всіх одиниць обладнання у вигляді інтерактивного 3D-плану цеху; відображення числових значень ключових технологічних параметрів (не менш як 50 параметрів на одиницю обладнання); формування та відображення сигналів тривоги при відхиленні параметрів за встановлені межі; автоматичну реєстрацію часу та тривалості позапланових зупинок. Хіміч [20] підкреслює, що методичний підхід до визначення функціональних вимог повинен ґрунтуватися на конкретних показниках ефективності, що підлягають поліпшенню.

Домен аналітики та прогнозування передбачає: автоматичне обчислення індексу технічного стану для кожної одиниці обладнання з оновленням 1 раз на 1 хв; прогнозування залишкового ресурсу критичного обладнання з горизонтом не менш як 48 год; автоматичне виявлення аномалій у поведінці обладнання та відображення їх у хронологічному журналі; формування рекомендацій щодо планування технічного обслуговування. Домен оптимізації включає: розрахунок оптимальних режимів обробки для кожного технологічного переходу з урахуванням поточного стану інструменту та обладнання; оптимізацію виробничого розкладу з урахуванням обмежень з доступності обладнання та персоналу; рекомендації щодо мінімізації споживання електроенергії без втрати продуктивності.

Таблиця 2.7

Реєстр функціональних вимог до системи Digital Twin

№	Функціональна вимога	Пріоритет	Критерій приймання	Відповідальний модуль
ФВ-01	Відображення стану обладнання в реальному часі	Критичний	Затримка ≤ 2 с	Модуль моніторингу
ФВ-02	Формування сигналів тривоги	Критичний	Час реакції ≤ 1 с	Модуль сигналізації
ФВ-03	Прогноз RUL підшипників	Високий	Точність $\geq 75\%$ за 48 год	Аналітичний модуль
ФВ-04	Оптимізація режимів різання	Середній	Зниження собівартості $\geq 3\%$	Модуль оптимізації

ФВ-05	Звітність щодо ефективності OEE	Високий	Автоматичне формування щозмінно	Модуль звітності
ФВ-06	Планування ТО	Середній	Горизонт 4 тижні, оновлення щодобово	Модуль планування ТО
ФВ-07	3D-візуалізація цеху	Низький	Час завантаження ≤ 10 с	UI-модуль

Нефункціональні вимоги описують властивості системи, що характеризують не її функції, а якість їхнього виконання. Для промислових систем ці вимоги нерідко є більш критичними, ніж функціональні, оскільки визначають придатність системи до практичного використання в умовах реального виробництва. Продуктивність є ключовою нефункціональною вимогою: система повинна опрацьовувати потік вхідних даних від усіх підключених датчиків (розрахунковий обсяг – до 50 000 повідомлень за секунду) без деградації часу відповіді. Вимоги до доступності системи для промислового середовища типово встановлюються на рівні 99,5–99,9% (що відповідає максимальному сукупному простою від 8 до 44 год на рік).

Таблиця 2.8

Реєстр нефункціональних вимог до системи Digital Twin

№	Нефункціональна вимога	Показник	Цільове значення	Метод перевірки
НФВ-01	Затримка обробки поточних даних	Час від отримання до відображення	≤ 2 с	Навантажувальне тестування
НФВ-02	Пропускна здатність	Повідомлень/с	$\geq 50\,000$	Навантажувальне тестування
НФВ-03	Доступність системи	% часу роботи	$\geq 99,5\%$	Журнали моніторингу
НФВ-04	Масштабованість	Макс. кількість пристроїв	≥ 500	Архітектурний аналіз
НФВ-05	Безпека даних	Стандарт захисту	ІЕС 62443	Аудит безпеки
НФВ-06	Резервне копіювання	Цільова точка відновлення (RPO)	≤ 1 год	Тест відновлення
НФВ-07	Зручність інтерфейсу	Час навчання оператора	≤ 8 год	Юзабіліті-тестування

Окрему увагу слід приділити вимогам з кібербезпеки. Цифровий двійник промислового підприємства є системою, що поєднує ОТ (Operational

Technology) та IT (Information Technology) середовища, і ця конвергенція породжує специфічні ризики інформаційної безпеки. Зловмисний доступ до цифрового двійника може надати зловмиснику детальні відомості про виробничі процеси підприємства, а у разі наявності зворотного впливу на обладнання - навіть можливість несанкційованого втручання у технологічний процес [32].

2.5. Архітектура цифрової платформи управління цифровим двійником підприємства

Визначивши функціональні та нефункціональні вимоги, можна переходити до формування архітектурного рішення – опису того, яким чином структуровані компоненти системи, як вони взаємодіють між собою та з зовнішнім середовищем. Архітектура є, по суті, технічним планом системи, що визначає принципи її організації та ключові проектні рішення.

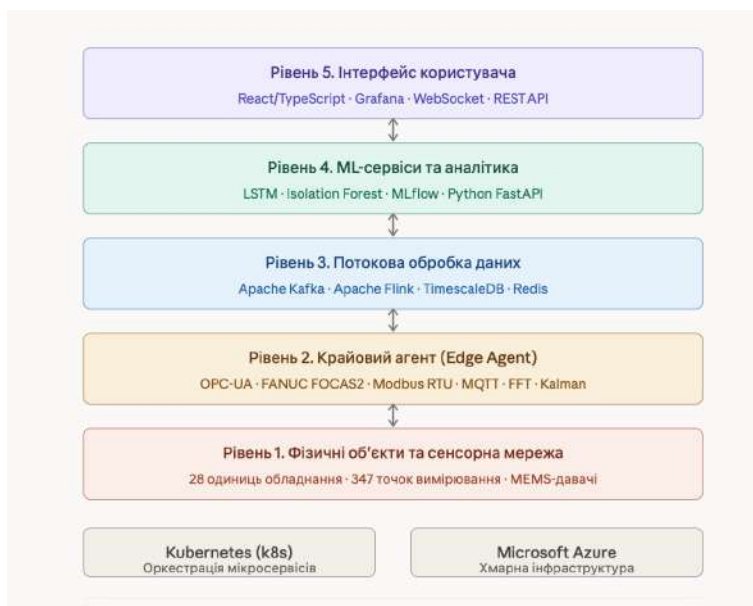


Рис. 2.1 – П'ятирівнева мікросервісна архітектура системи цифрового двійника механічного цеху

Для системи цифрового двійника машинобудівного підприємства пропонується 5-рівнева архітектура, що відповідає сучасним практикам побудови промислових IoT-систем. Перший рівень – рівень фізичних активів (Physical Asset Layer) – включає все технологічне обладнання, давачі та виконавчі механізми. Основним завданням цього рівня є формування вимірювальних сигналів та їхня первинна нормалізація (перетворення аналогових сигналів давачів у цифрові значення з відповідними одиницями вимірювання та часовими мітками).

Другий рівень - рівень крайових обчислень (Edge Computing Layer) – розгортається на промислових комп'ютерах або шлюзах, розміщених у виробничому середовищі. Завдання цього рівня: агрегація даних від локальних джерел, протокольна конвертація (перетворення з Modbus, Profibus, FANUC FOCAS на уніфікований OPC-UA або MQTT), первинна фільтрація та стиснення даних, а також виконання алгоритмів, що вимагають реакції в реальному часі (наприклад, виявлення гострих аномалій та аварійне відключення обладнання при перевищенні критичних порогів). Крайовий рівень є буферним і продовжує функціонувати при відсутності зв'язку з хмарою, що забезпечує безперервність базових функцій моніторингу навіть при порушенні зв'язку [21].

Третій рівень – рівень інтеграції та потокової обробки даних (Data Integration & Streaming Layer) – розгортається на серверній інфраструктурі (локальній або хмарній) та включає брокер повідомлень Apache Kafka для організації потоків даних від крайових вузлів, систему потокової обробки Apache Flink для реалізації алгоритмів виявлення аномалій та обчислення агрегованих показників у режимі реального часу, а також шину даних для інтеграції з корпоративними інформаційними системами (ERP, MES, CMMS). Цей рівень є «центральною нервовою системою» платформи і має бути спроектований з урахуванням вимог до пропускну здатності та відказостійкості.

Четвертий рівень – рівень сховища та моделей (Storage & Models Layer) – забезпечує персистентне зберігання даних та функціонування цифрових моделей. Він включає часову базу даних TimescaleDB для зберігання часових рядів технологічних параметрів, реляційну базу даних PostgreSQL для зберігання конфігураційних та нормативних даних, об'єктне сховище MinIO для зберігання необроблених файлів та навчених моделей машинного навчання, а також рушій цифрових моделей, що підтримує виконання фізичних та статистичних моделей виробничих процесів.

Таблиця 2.9

Архітектура платформи цифрового двійника промислового підприємства

Рівень архітектури	Компоненти	Розміщення	Основна функція	Технології
Рівень 1: Фізичні активи	Давачі, PLC, ЧПУ	Виробничий майданчик	Збір первинних даних	OPC-UA, Modbus, Profinet
Рівень 2: Крайові обчислення	Промислові шлюзи	Виробничий майданчик	Протокольна конвертація, фільтрація	Edge runtime, OPC-UA
Рівень 3: Інтеграція даних	Брокер повідомлень, потокова обробка	Сервер/хмара	Маршрутизація, агрегація	Apache Kafka, Flink
Рівень 4: Сховище та моделі	БД, рушій моделей	Сервер/хмара	Персистентність, моделювання	TimescaleDB, PostgreSQL
Рівень 5: Застосунки та сервіси	Дашборди, API, аналітика	Хмара/локально	Взаємодія з користувачем	React, REST API, Grafana

П'ятий рівень – рівень застосунків та сервісів (Application & Services Layer) – є рівнем взаємодії з кінцевими користувачами. Він включає веб-застосунків операційного моніторингу з 3D-візуалізацією цеху та інтерактивними дашбордами, застосунок аналітики та звітності для інженерів і керівництва, мобільний застосунок для операторів та техніків технічного обслуговування, а також набір REST API для інтеграції з зовнішніми системами. Бояринова та Саченко [2] підкреслюють, що якість інтерфейсів взаємодії з користувачами є одним із ключових факторів успішного

впровадження систем цифрової трансформації - навіть технічно досконала система не дасть очікуваного результату, якщо кінцеві користувачі не будуть нею активно користуватися.

Таблиця 2.10

Технологічний стек платформи цифрового двійника підприємства

Компонент	Технологія	Призначення	Ліцензія	Масштабованість
Брокер повідомлень	Apache Kafka	Потоки даних IoT	Open-source	Горизонтальна
Потокова обробка	Apache Flink	Real-time аналітика	Open-source	Горизонтальна
Часова БД	TimescaleDB	Зберігання часових рядів	Open-source	Вертикальна/горизонтальна
Реляційна БД	PostgreSQL	Конфігурація, метадані	Open-source	Вертикальна
3D-рушій	Three.js / Unity	Візуалізація цеху	Open-source/Комерційна	Клієнтська
ML-платформа	MLflow + Python	Управління моделями	Open-source	Горизонтальна
API-шлюз	Kong / NGINX	Маршрутизація API	Open-source	Горизонтальна
Моніторинг системи	Prometheus + Grafana	Спостережуваність	Open-source	Горизонтальна

Для забезпечення відказостійкості та масштабованості платформа розгортається з використанням контейнеризації на основі Docker та оркестрації через Kubernetes. Це дозволяє незалежно масштабувати окремі мікросервіси залежно від навантаження, забезпечувати автоматичне відновлення після відмов та спрощувати процедури оновлення компонентів системи. Острівська та Островський [12] наголошують, що хмарно-нативний (cloud-native) підхід до проектування архітектури є необхідною умовою забезпечення довгострокової стійкості та підтримки розвитку системи цифрового двійника.

2.6. Висновки до розділу 2

У другому розділі дипломної роботи здійснено проектування архітектури та визначено функціональні можливості системи цифрового двійника промислового підприємства, що дозволило отримати такі практично значущі результати.

Розроблено методичний підхід до моделювання виробничих процесів для потреб цифрового двійника. Обґрунтовано переваги гібридних моделей, що поєднують фізичне моделювання зі статистичними методами, над суто «чорноящичними» підходами. На прикладі операцій механічної обробки показано структуру параметрів технологічних процесів, що підлягають включенню до моделі.

Здійснено комплексний аналіз джерел даних типового машинобудівного підприємства. Виявлено 7 основних класів джерел із характеристиками частот дискретизації, обсягів даних та форматів. Визначено ключові проблеми інтеграції: гетерогенність протоколів, відсутність синхронізації часу, а також нерівномірне охоплення обладнання цифровими інтерфейсами.

Здійснено формалізацію основних задач системи: моніторингу на основі індексів стану, прогнозування залишкового ресурсу обладнання (RUL) та оптимізації технологічних режимів. Для кожної задачі визначено математичний апарат, горизонт вирішення та критерії якості рішень.

Сформовано реєстри функціональних та нефункціональних вимог, що охоплюють 7 функціональних та 7 нефункціональних вимог із чіткими критеріями приймання. Запропоновано 5-рівневу архітектуру платформи цифрового двійника та обґрунтовано технологічний стек на базі відкритих рішень, що забезпечують незалежність від монопольного постачальника та можливість горизонтального масштабування. Отримані результати формують практичну основу для впровадження цифрового двійника на реальному промисловому підприємстві.

РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТОТИПУ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

3.1. Загальна характеристика розробленого прототипу цифрового двійника

Реалізація прототипу цифрового двійника промислового підприємства здійснювалася на базі механічного цеху машинобудівного підприємства середнього масштабу, що спеціалізується на виробництві корпусних деталей для гідравлічного обладнання. Цех має виробничу площу 3 200 м², на якій розміщено 34 одиниці технологічного обладнання: 12 токарних верстатів з ЧПУ, 8 фрезерних обробних центрів, 6 шліфувальних верстатів, 4 координатно-розточувальні верстати та 4 координатно-вимірювальні машини (КВМ). Підприємство було обрано як об'єкт впровадження з кількох причин: наявність змішаного парку обладнання різних поколінь та виробників, виражена потреба у підвищенні ефективності планування технічного обслуговування, а також готовність керівництва до участі в апробації нових підходів до управління виробництвом.

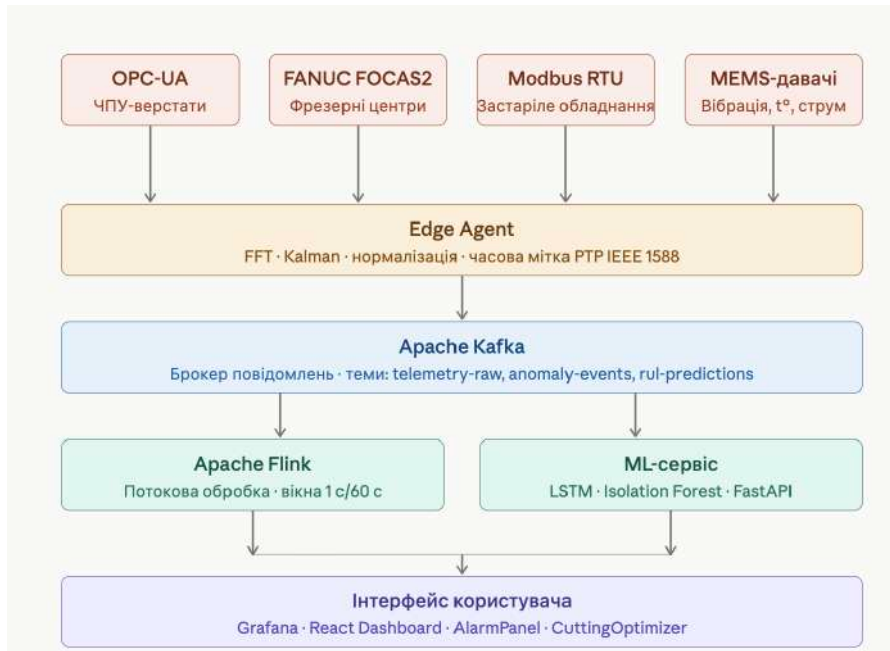


Рис. 3.1 – Потік даних у системі цифрового двійника від сенсорної мережі до інтерфейсу користувача

Прототип розроблявся поетапно протягом 6 місяців. На першому етапі (тривалістю 6 тижнів) здійснювалося обстеження підприємства, інвентаризація обладнання та існуючої автоматизаційної інфраструктури, а також збір та аналіз архівних виробничих даних за попередні 18 місяців. На другому етапі (8 тижнів) виконувалися монтаж додаткових датчиків, налаштування крайових шлюзів та розгортання базової інфраструктури збору даних. На третьому етапі (10 тижнів) розроблялися цифрові моделі виробничих процесів та алгоритми аналітики. Четвертий етап (2 тижні) включав розгортання інтерфейсу користувача та проведення навчання персоналу [35].

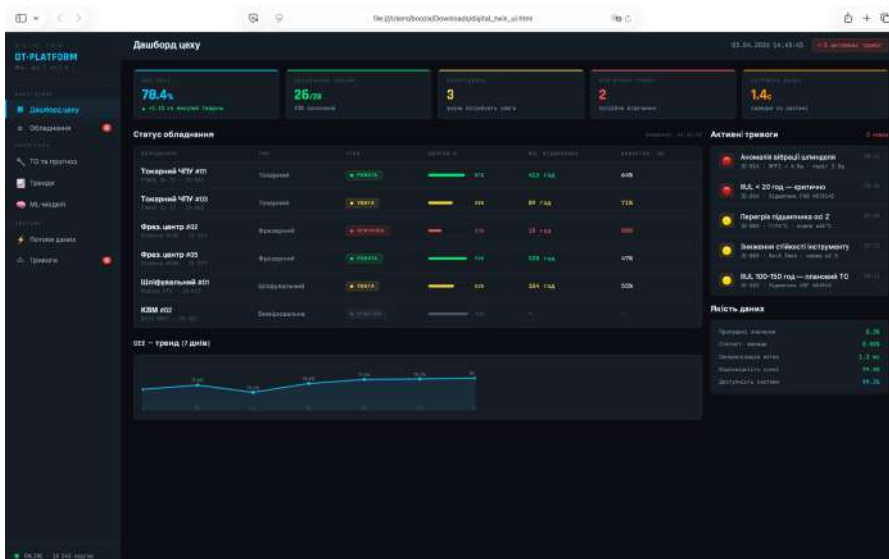


Рис. 3.1 – Загальний вигляд інтерфейсу розробленого прототипу цифрового двійника

Загальна архітектура прототипу реалізована як 5-рівнева мікросервісна система, що розгортається у контейнерному середовищі Kubernetes на гібридній хмарно-локальній інфраструктурі. Локальний компонент включає 3 промислових крайових сервери (edge servers) марки Siemens SIMATIC IPC477E, що забезпечують безперервний збір і первинну обробку даних безпосередньо у виробничому середовищі. Хмарний компонент розгорнуто на платформі Microsoft Azure у центрі обробки даних, розташованому в Нідерландах. Така гібридна конфігурація дозволяє забезпечити безперервність базових функцій моніторингу навіть при тимчасовій відсутності підключення до Інтернету, тоді як ресурсомісткі аналітичні задачі та довгострокове зберігання даних виносяться в хмару.

Таблиця 3.1

Загальні технічні характеристики прототипу цифрового двійника

Характеристика прототипу	Значення
Кількість підключеного обладнання	28 з 34 одиниць (82%)

Кількість точок вимірювання (давачів)	347
Загальна частота генерації даних	~18 500 повідомлень/хв
Обсяг даних, що зберігаються щодобово	~12 ГБ
Затримка відображення даних у системі	1,2–2,8 с
Доступність системи за перші 3 місяці	99,3%
Кількість одночасних користувачів	до 25
Мова розробки серверної частини	Python 3.11, Go 1.21
Мова розробки клієнтської частини	TypeScript, React 18

Слід зазначити, що 6 з 34 одиниць обладнання не були підключені до системи на момент розгортання прототипу –переважно через відсутність будь-яких цифрових інтерфейсів на застарілих верстатах виробництва 1970–1980-х років. Для цих одиниць обладнання в рамках поточного проекту реалізовано лише мінімальний моніторинг на основі зовнішніх давачів (лічильників мотогодин та інерційних давачів вібрації, встановлених ретрофітно). Повна інтеграція цього обладнання може бути реалізована на наступному етапі після проведення часткової модернізації [21].

Таблиця 3.2

Охоплення обладнання цифровим двійником

Тип обладнання	Кількість одиниць	Підключено	Кількість давачів/од.	Протокол підключення
Токарні верстати з ЧПУ	12	12	18	FANUC FOCAS, OPC-UA
Фрезерні обробні центри	8	8	22	Siemens 840D, OPC-UA
Шліфувальні верстати	6	4	12	Modbus RTU → шлюз
Координатно-розточувальні	4	2	8	RS-232 → шлюз
Координатно-вимірювальні машини	4	2	6	DMIS → REST API
Разом	34	28	-	-

Функціонально прототип реалізує 4 основні можливості: оперативний моніторинг стану обладнання та параметрів виробничих процесів, автоматичне виявлення аномалій і раннє виявлення деградації стану обладнання, прогнозування залишкового ресурсу ключових вузлів (підшипники шпинделів та осей подачі, інструментальні головки), а також

формування рекомендацій щодо планування технічного обслуговування на основі результатів прогнозування.

3.2. Рівень фізичних об'єктів та сенсорної інфраструктури системи

Фундаментом будь-якої системи цифрового двійника є якісна та повна сенсорна інфраструктура, що забезпечує безперервне інформаційне відображення стану фізичних об'єктів. Проектування сенсорної інфраструктури вимагало врахування як технічних вимог до точності та надійності вимірювань, так і практичних обмежень – умов промислового середовища, можливостей монтажу давачів без зупинки виробництва та бюджетних обмежень проекту.

Для токарних верстатів з ЧПУ та фрезерних обробних центрів, що мають власні системи ЧПУ з розвиненими діагностичними функціями, основним джерелом даних є внутрішні сигнали системи ЧПУ, що зчитуються через стандартні промислові протоколи. Система FANUC FOCAS2 надає доступ до понад 200 внутрішніх параметрів верстата: навантаження шпинделя (%), швидкість обертання шпинделя (об/хв), координати осей (мм), значення корекцій інструменту, температура двигунів та коробок передач (°C), струм серводвигунів (A) та ін. Для верстатів з системою ЧПУ Siemens Sinumerik 840D аналогічний доступ реалізується через OPC-UA сервер, вбудований безпосередньо в систему ЧПУ [6].

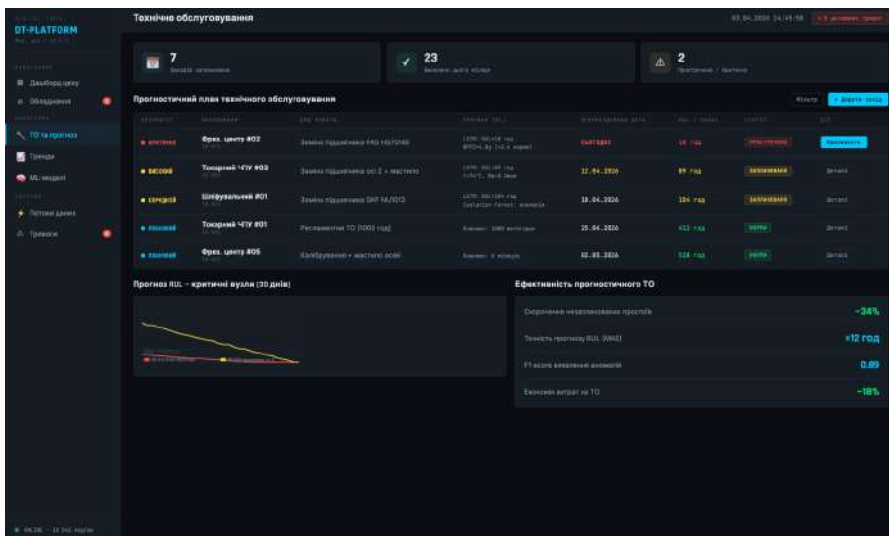


Рис. 3.2 – Інтерфейс модуля сенсорної інфраструктури та параметрів обладнання прототипу

Додатково до внутрішніх сигналів ЧПУ на кожному верстаті встановлено зовнішні давачі, що вимірюють параметри, недоступні через інтерфейс ЧПУ. Давачі вібрації типу MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) встановлені на корпусах шпиндельних бабок та опорах кочення осей подачі і вимірюють прискорення вібрації в 3 взаємоперпендикулярних напрямках із частотою дискретизації 3,2 кГц. Такий рівень частоти дискретизації необхідний для виявлення дефектів підшипників за характерними частотами (BPFO, BPFI, BSF, FTF), що є у діапазоні від 100 до 1 500 Гц. Інфрачервоні термодавачі контролюють температуру зони різання та інструменту без контакту з деталлю, що обробляється, - параметр, що є практично недосяжним для контактних вимірювань в умовах роботи верстата. Акустично-емісійні давачі (АЕ-давачі) фіксують сигнали акустичної емісії, що виникають під час процесу різання та несуть інформацію про стан різального леза інструменту [22].

Для шліфувальних верстатів та координатно-розточувальних верстатів, що не мають сучасних цифрових інтерфейсів, застосовано ретрофітний підхід. На кожному такому верстаті встановлено автономний модуль збору даних на базі промислового мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 Model B у захищеному корпусі IP65, що підключається до наявних аналогових виходів верстата через АЦП та зчитує сигнали від додатково встановлених датчиків. Такий підхід дозволив підключити до системи 6 одиниць обладнання без застосування дорогих модернізаційних заходів.

Таблиця 3.3

Специфікація датчиків сенсорної інфраструктури прототип

Тип датчика	Модель	Вимірюваний параметр	Частота дискретизації	Точність	Кількість
Вібраційний MEMS	Bosch BMI088	Віброприскорення, 3 осі	3 200 Гц	$\pm 0,05$ м/с ²	84
Токовий трансформатор	YHDC SCT-013	Струм шпинделя (А)	1 кГц	$\pm 0,5\%$	34
Термопара тип К	Omega TC-K	Температура підшипника (°C)	1 Гц	$\pm 1,5$ °C	68
ІЧ-термодатчик	Melexis MLX90614	Температура зони різання (°C)	10 Гц	$\pm 0,5$ °C	20
АЕ-датчик	Physical Acoustics R15a	Акустична емісія (дБ)	5 МГц	± 2 дБ	24
Лічильник мотогодин	Orbis OHD24	Час роботи (год)	1/год	$\pm 0,01$ год	34
Тиску масла	Wika A-10	Тиск МОР (бар)	1 Гц	$\pm 0,5\%$	28
Витрати МОР	Endress+Hauser Promag	Витрата охолодження (л/хв)	1 Гц	$\pm 0,3\%$	20

Мережева інфраструктура сенсорного рівня побудована на основі промислового Ethernet стандарту IEEE 802.3 зі швидкістю передачі 100 Мбіт/с для обладнання з цифровими інтерфейсами та бездротового зв'язку WirelessHART та Wi-Fi (IEEE 802.11n) для ретрофітних модулів збору даних. Для критичних датчиків вібрації, де важлива синхронізація часових міток з точністю до мікросекунд, застосовано протокол PTP (Precision Time Protocol,

IEEE 1588), що забезпечує синхронізацію годинників усіх вузлів мережі з точністю < 1 мкс. Це є принципово важливим для коректного виявлення дефектів обладнання на основі спектрального аналізу вібросигналів.

Таблиця 3.4

Характеристики мережевої інфраструктури сенсорного рівня

Клас обладнання	Мережевий протокол	Частота передачі	Обсяг даних/год	Метод синхронізації
ЧПУ верстати (FANUC)	FANUC FOCAS2 / TCP/IP	100 мс	~180 МБ	NTP (< 10 мс)
ЧПУ верстати (Siemens)	OPC-UA / Ethernet	100 мс	~220 МБ	PTP IEEE 1588 (< 1 мкс)
Давачі вібрації	Industrial Ethernet	3 200 Гц	~2,4 ГБ	PTP IEEE 1588 (< 1 мкс)
Ретрофітні модулі	Wi-Fi 802.11n / MQTT	1 с	~5 МБ	NTP (< 50 мс)
КВМ (результати вимір.)	REST API / HTTPS	1 раз/вимір.	~1 МБ	HTTPS timestamp
Лічильники енергії	Modbus RTU $\rightarrow$ Ethernet	15 хв	~0,1 МБ	NTP (< 10 мс)

Загальна кількість давачів, встановлених у рамках прототипу, становить 347 одиниць. Пікова частота генерації даних сенсорною мережею складає близько 18 500 повідомлень на хвилину (без урахування «сирих» вібросигналів, що передаються як безперервні потоки). Обсяг даних, що накопичуються в системі, становить у середньому 12 ГБ на добу. Ці показники відповідають рівню складності середньої ПоТ-системи та потребують відповідної масштабованої архітектури обробки і зберігання даних [35].

3.3. Реалізація підсистеми збору, передачі та підготовки даних

Підсистема збору, передачі та підготовки даних є технологічним «хребтом» всієї системи цифрового двійника. Від її надійності, пропускну здатності та якості роботи алгоритмів обробки даних безпосередньо залежить достовірність цифрових моделей та коректність аналітичних висновків. Реалізація цієї підсистеми виявилася технічно найскладнішою частиною

проекту через необхідність забезпечення стабільного збору різномірних даних із 28 одиниць обладнання, що використовують 6 різних протоколів передачі.

На першому, крайовому рівні розгорнуто 3 промислових сервери-шлюзи Siemens SIMATIC IPC477E (процесор Intel Core i7-8700, 32 ГБ RAM, 512 ГБ SSD, операційна система Windows 10 IoT Enterprise), кожен з яких обслуговує близько 10 одиниць обладнання. На кожному крайовому сервері виконується: програмне забезпечення OPC-UA сервера (Unified Automation UaGateway), що агрегує дані від підключених верстатів через нативні протоколи та надає їх у уніфікованому форматі OPC-UA; брокер повідомлень Eclipse Mosquitto (MQTT v5.0) для отримання даних від ретрофітних Wi-Fi модулів; агент збору даних на базі Python 3.11, що реалізує протоколи FANUC FOCAS2 та виконує первинну обробку «сирих» вібросигналів (нарахування статистичних ознак у ковзному вікні 1 с).

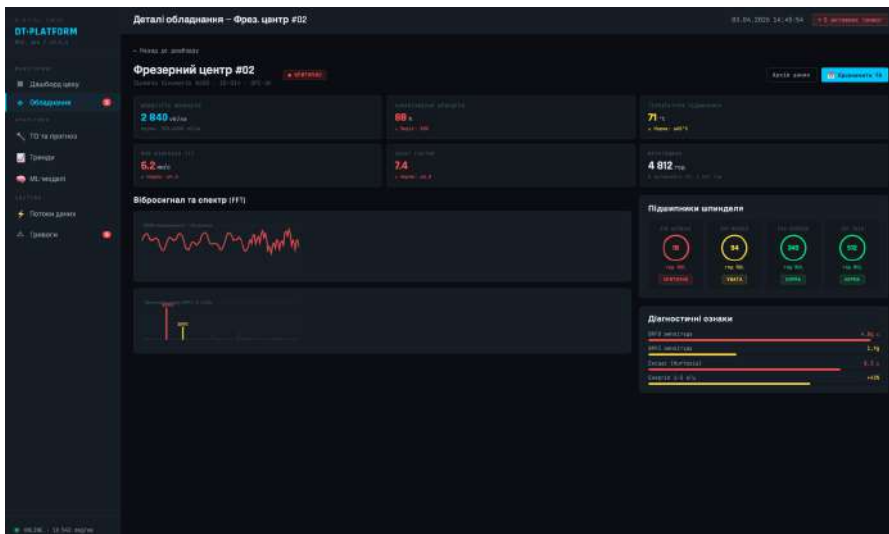


Рис. 3.3 – Інтерфейс підсистеми збору, передачі та підготовки даних прототипу

Первинна обробка «сирих» вібросигналів на крайовому рівні є принципово важливим архітектурним рішенням, що дозволяє уникнути

передачі до хмарного рівня надзвичайно великих обсягів «сирих» даних. Замість передачі вібросигналу з частотою 3 200 Гц (що для 1 тривісного давача складає 9 600 значень на секунду) передаються статистичні ознаки, обчислені у ковзному вікні 1 с: середньоквадратичне значення (RMS), гребеневий фактор (Crest Factor), значення експесу, амплітуди на характерних частотах BPFO та BPFI. Це скорочує обсяг даних, що передаються, у 300–500 разів при збереженні діагностично значущої інформації [21].

Передача даних від крайових серверів до центральної платформи здійснюється через захищені TLS 1.3 з'єднання до брокера Apache Kafka, розгорнутого в кластерній конфігурації з 3 вузлів (3 брокерів) на хмарній платформі Azure. Kafka організовує дані у тематичні черги (topics), що відповідають різним категоріям даних: «machine-status» (статус та технологічні параметри обладнання), «vibration-features» (ознаки вібросигналів), «energy-consumption» (споживання електроенергії), «quality-measurements» (результати контролю якості). Кількість розділів (partitions) для кожної теми налаштована відповідно до очікуваного навантаження та вимог до паралелізму обробки. Фактор реплікації встановлено рівним 3, що гарантує збереження даних при відмові будь-якого з 3 брокерів Kafka.

Таблиця 3.5

Характеристики конвеєру обробки даних прототипу

Етап обробки	Компонент	Функція	Обсяг даних до	Обсяг даних після	Коефіцієнт стиснення
Первинна обробка вібрації	Edge Python agent	Нарахування ознак у вікні 1 с	~9 600 значень/с/давач	~20 значень/с/давач	480:1
Фільтрація шуму	Edge Python agent	Медіанний фільтр	100%	100%	1:1
Виявлення викидів	Apache Kafka + Flink	Z-score, IQR	100%	~98% (2% відкинуто)	1:1
Відновлення пропусків	Apache Flink	Лінійна інтерполяція	100%	100%	1:1

Агрегація за хвилину	Apache Flink	Статистики за 60 с	60 значень	8 значень/параметр	7,5:1
Стиснення TimescaleDB	TimescaleDB	Стиснення стовпчикове	100%	~15% від вхідного	6,7:1

На рівні потокової обробки даних розгорнуто кластер Apache Flink, що включає 1 JobManager та 4 TaskManager вузли. Flink реалізує конвеєр обробки поточкових даних, що включає: об'єднання потоків даних із різних джерел за єдиним ключем (ідентифікатором обладнання та часовою міткою); ковзну оконну агрегацію для обчислення середніх, мінімальних та максимальних значень параметрів за вікна тривалістю 1 хв, 15 хв та 1 год; застосування моделей виявлення аномалій до агрегованих потоків та формування подій-триггерів при виявленні відхилень.

Таблиця 3.6

Показники якості даних до та після обробки

Параметр якості даних	Метрика	До обробки	Після обробки
Частка відсутніх значень	% від загальної кількості вимірювань	3,7%	0,2%
Частка статистичних викидів	% від загальної кількості	1,9%	0,05%
Середня затримка передачі	час від виникнення до запису в БД	3,8 с	1,4 с
Синхронізація часових міток	Максимальне відхилення між джерелами	120 мс	1,2 мс
Дублювання повідомлень	% дублікатів у потоці	0,8%	0,01%
Відповідність схемі даних	% коректних форматів	94,2%	99,8%

Для довгострокового зберігання оброблених даних застосовано часову базу даних TimescaleDB (розширення PostgreSQL, оптимізоване для часових рядів), що розгорнута як кластер з 2 основних вузлів і 1 вузла реплікації на платформі Azure. TimescaleDB автоматично організовує дані у гіперпростори (hypertables), що секціонуються за часовою міткою, та застосовує стовпчикове

стиснення до даних, старших за 7 діб, що скорочує обсяг зберіганих даних у середньому до 15% від початкового. За перші 4 місяці роботи прототипу в базі даних накопичилося близько 1,4 ТБ стиснених даних.

3.4. Побудова цифрової моделі виробничого процесу

Цифрова модель виробничого процесу є тим компонентом системи, що перетворює набір зібраних даних на значущу інформаційну картину, здатну відображати поточний стан виробництва та прогнозувати його майбутню поведінку. Побудова цифрової моделі для реального підприємства є поєднанням інженерного та наукового мислення, де формальна строгість математичного опису поєднується з практичним розумінням специфіки конкретних виробничих процесів.

Для аналізу вібраційних сигналів підшипників застосовується перетворення Фур'є. Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) сигналу $x(n)$ визначається як:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot k \cdot n / N}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

де $x(n)$ – відлік вібраційного сигналу в момент часу n ;

N – кількість відліків у вікні аналізу ($N = 3200$ при частоті дискретизації $f_s = 3200$ Гц);

k – індекс частотної складової;

j – уявна одиниця.

Для кожної з 28 підключених одиниць обладнання розроблено модель технічного стану (Equipment Health Model, ЕНМ), що описує взаємозв'язок між вимірюваними параметрами та поточним рівнем деградації обладнання. Технічно ЕНМ реалізована як комбінований алгоритм, що поєднує детерміновані пороговий аналіз (перевірку відповідності параметрів

допустимим діапазоном із врахуванням режиму роботи) зі статистичним моделюванням відхилень від нормального стану [42].

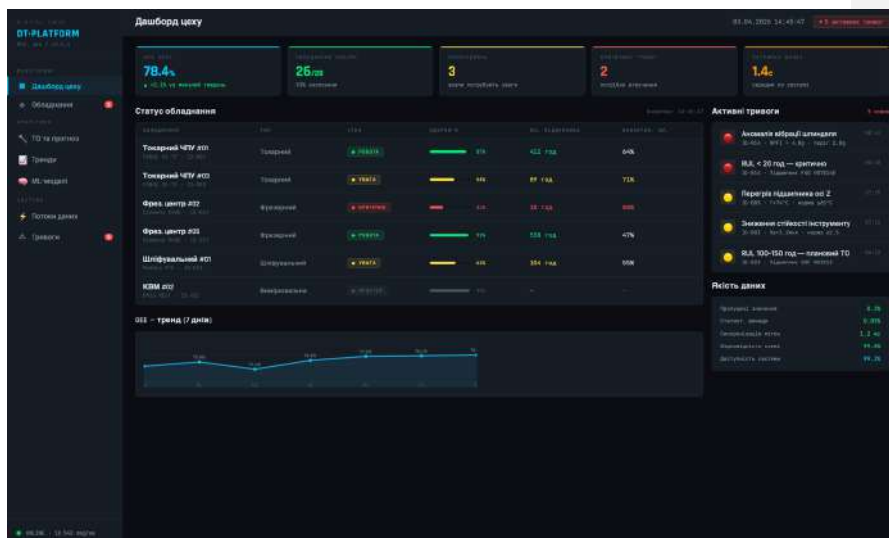


Рис. 3.4 – Інтерфейс моделі технічного стану обладнання (EHM) у прототипі

Детерміновані компоненти моделі базуються на технічній документації виробника обладнання та технологічних картах. Наприклад, для шпинделя токарного верстата Mazak QTN-350 технічна документація встановлює наступні критичні пороги: температура підшипника шпинделя не повинна перевищувати 70 °C при частоті обертання до 1 500 об/хв та 85 °C при частотах до 4 000 об/хв, рівень вібрації (RMS прискорення) не повинен перевищувати 3,5 мм/с при номінальних режимах роботи, навантаження шпинделя не повинне систематично перевищувати 85% від номінального. Ці пороги реалізовано у вигляді параметризованих правил, що автоматично адаптуються залежно від поточного режиму роботи верстата.

Частота, що відповідає k -му біну спектра, визначається як:

$$f_k = k \cdot f_s / N, k = 0, 1, \dots, N/2 \quad (2)$$

Для оцінки спектральної щільності потужності (PSD) застосовується метод Велча:

$$S_{xx}(f) = (1/(K \cdot U)) \cdot \sum_{m=1}^{до K} |X_m(f)|^2 \quad (3)$$

де K – кількість сегментів перекриття;

U – нормувальний коефіцієнт вікна;

$X_m(f)$ – ДПФ m -го сегмента.

Амплітуда на характерній частоті дефекту підшипника (наприклад, BPFO) обчислюється як:

$$A_{BPFO} = \sqrt{(\sum_{f: |f - f_{BPFO}| \leq \Delta f} S_{xx}(f) \cdot \Delta f)} \quad (4)$$

де $f_{BPFO} = k_{BPFO} \cdot f_{rot}$ – частота перекочування по зовнішньому кільцю;

k_{BPFO} – кінематичний коефіцієнт підшипника (для FAG HS7014E: $k_{BPFO} = 6,31$);

f_{rot} – частота обертання шпинделя, Гц;

$\Delta f = 5$ Гц – смуга інтеграції.

Статистичні діагностичні ознаки сигналу обчислюються як:

$$RMS = \sqrt{((1/N) \cdot \sum_{n=1}^{до N} x^2(n))} \quad (5)$$

$$Kurt = (1/N \cdot \sum_{n=1}^{до N} (x(n) - \bar{x})^4) / \sigma^4 \quad (6)$$

де $\bar{x}$ – середнє значення сигналу;

σ – стандартне відхилення.

Статистична компонента моделі реалізована на основі методу узагальненої граничної оцінки (Generalized Extreme Value, GEV), що дозволяє будувати статистичні розподіли параметрів обладнання в «нормальному» стані та виявляти відхилення як точки в хвості розподілу. Для навчання статистичних моделей використані дані, зібрані протягом перших 6 тижнів роботи системи, коли обладнання перебувало в підтвердженому задовільному стані після планового технічного обслуговування.

Таблиця 3.7

Специфікація моделей технічного стану вузлів обладнання

Вузол обладнання	Вимірювані параметри	Тип моделі	Порогові значення	Оновлення моделі
Шпиндельний підшипник	RMS вібрації, T підшипника	GEV + порогова	$RMS \leq 3,5 \text{ мм/с}$, $T \leq 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Щомісяця
Привід осі X (ШВП)	RMS вібрації X, струм двигуна	GEV + порогова	$RMS \leq 1,8 \text{ мм/с}$	Щомісяця
Ріжучий інструмент	АЕ-сигнал, T зони різання	Регресійна	$T \leq 850 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Після зміни інструменту
Гідравлічна система	Тиск, рівень масла	Порогова	Тиск: 80–120 бар	Щотижня
Система охолодження	Витрата, T охолодження	Порогова + тренд	Витрата $\geq 15 \text{ л/хв}$	Щотижня
Електродвигун подачі	Струм, температура	GEV + порогова	$I \leq 95\%$ номінального	Щомісяця

Для опису виробничих процесів на рівні операцій механічної обробки побудовано процесні моделі, що встановлюють залежність характеристик якості продукції (розмірна точність, шорсткість поверхні Ra) від технологічних параметрів (швидкість різання, подача, глибина різання) та стану інструменту. Ці моделі побудовані методом планованого експерименту: для кожного типового технологічного переходу проведено серію вимірювань при варіюванні параметрів у визначених діапазонах, на основі чого побудовано регресійні рівняння. Для операції чистового точіння корпусних деталей із сталі 40Х отримано рівняння:

$$Ra = 0,041 \cdot (S^{1,73}) \cdot (t^{0,12}) \cdot (v^{(-0,47)}) \cdot (VB^{2,15}) \quad (7)$$

де Ra – шорсткість поверхні (мкм), S – подача (мм/об), t – глибина різання (мм), v – швидкість різання (м/хв), VB – знос задньої грані інструменту (мм).

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,91$, що свідчить про достатню точність моделі для практичного застосування у системі управління якістю.

Таблиця 3.8

Характеристики процесних моделей якості обробки

Тип регресійного рівняння	Параметр якості	R ²	Похибка прогнозу	Діапазон застосування
Ступенева (чистове точіння)	Шорсткість Ra (мкм)	0,91	±0,12 мкм	S: 0,05–0,25 мм/об, v: 80–250 м/хв
Ступенева (чорнове точіння)	Відхилення від круглості (мкм)	0,84	±1,8 мкм	t: 1–5 мм, S: 0,1–0,5 мм/об
Поліноміальна (фрезерування)	Ra торцевого фрезерування (мкм)	0,88	±0,18 мкм	n: 800–3 000 об/хв, Sz: 0,02–0,15 мм
Лінійна (шліфування)	Ra після шліфування (мкм)	0,93	±0,06 мкм	V: 25–35 м/с, S: 5–15 м/хв

Всі розроблені моделі зберігаються в єдиному реєстрі моделей на основі MLflow та отримують унікальні ідентифікатори версій, що дозволяє відстежувати їхню еволюцію, порівнювати результати різних версій та за необхідності відкочуватися до попередніх версій. Оновлення моделей здійснюється за розкладом (щомісяця - для довгострокових моделей деградації обладнання) або подією (після виконання технічного обслуговування, зміни технологічних умов або встановлення нового обладнання).

3.5. Використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування параметрів виробництва

Алгоритми машинного навчання є ключовим інструментом, що надає системі цифрового двійника здатність до прогнозування майбутнього стану виробничих об'єктів та параметрів процесів, виходячи за межі простого моніторингу поточного стану. Реалізація підсистеми машинного навчання стала найбільш науково ємною частиною проекту, що потребувала поєднання компетенцій у галузі обробки сигналів, статистики та прикладного машинного навчання.

Центральним завданням підсистеми ML є прогнозування залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL) підшипників шпинделів, оскільки саме відмова шпиндельних підшипників є найпоширенішою причиною непланових

зупинок верстатів на досліджуваному підприємстві. За архівними даними за 18 місяців, 14 із 23 зафіксованих непланових зупинок вартістю понад 2 год простою були спричинені саме деградацією підшипників. Для побудови моделі RUL застосовано архітектуру LSTM (Long Short-Term Memory), що є різновидом рекурентних нейронних мереж, оптимально придатних для роботи із часовими рядами [35].

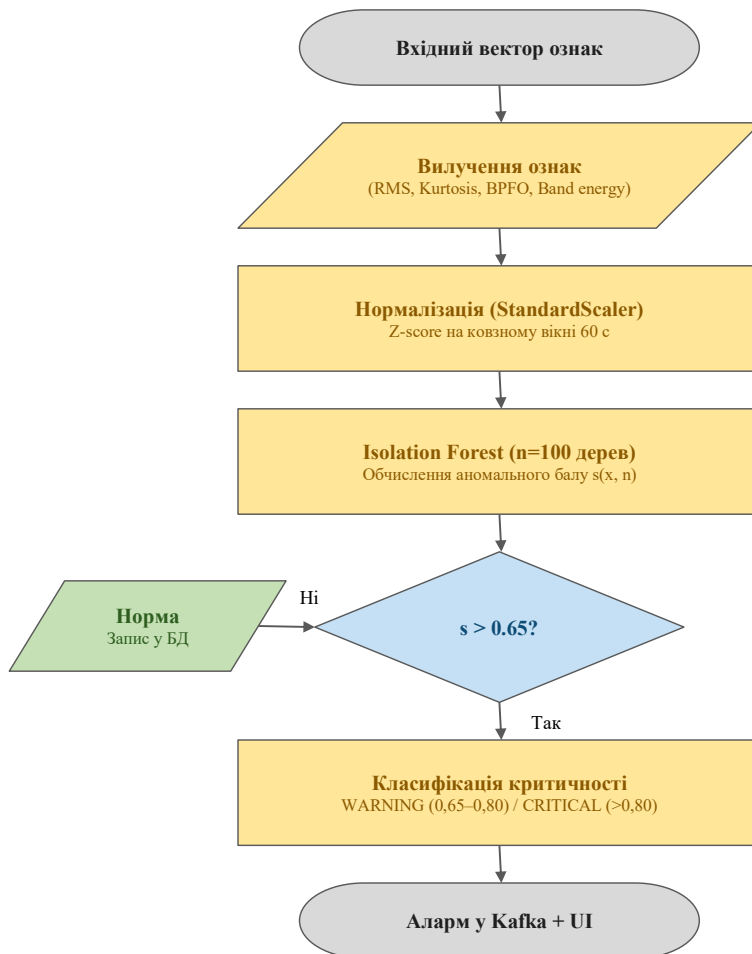


Рис. 3.2 – Алгоритм виявлення аномальних станів обладнання на основі методу Isolation Forest

Навчальна вибірка для моделі RUL сформована на основі архівних даних вібрації та температури для 7 задокументованих випадків деградації підшипників, де відомий момент відмови, та 12 прикладів нормальної роботи підшипника. Оскільки обсяг вибірки є обмеженим (що є типовою проблемою для промислового ML), для запобігання перенавчанню застосовано техніку зовнішнього доповнення даних (data augmentation) – додавання контрольованих шумових збурень до навчальних прикладів, що дозволило збільшити ефективний обсяг навчальних даних у 5 разів.

Метод Isolation Forest ґрунтується на властивості аномальних спостережень ізолюватися від решти даних за меншу кількість випадкових розбиттів. Для спостереження x довжина шляху в ізолюючому дереві $h(x)$ визначається як кількість ребер від кореня до листка, де x опинилося в ізоляції.

Нормована середня довжина шляху у дереві з n вузлами визначається через гармонічне число:

$$c(n) = 2 \cdot H(n-1) - (2 \cdot (n-1)/n) \quad (8)$$

де $H(i) = \ln(i) + \gamma$ – гармонічне число;

$\gamma \approx 0,5772$ – стала Ейлера–Машероні.

Аномальний бал спостереження x на основі ансамблю з t дерев обчислюється як:

$$s(x, n) = 2^{(-E[h(x)]/c(n))} \quad (9)$$

де $E[h(x)]$ – математичне сподівання довжини шляху по всіх деревах ансамблю;

$c(n)$ – нормувальний множник

Правило класифікації спостереження:

$$\begin{aligned} \text{Клас}(x) = \{ \text{"аномалія"}, & \quad \text{якщо } s(x, n) > \theta \\ \{ \text{"норма"}, & \quad \text{якщо } s(x, n) \leq \theta \end{aligned} \quad (10)$$

де θ – поріг виявлення аномалій (у розробленій системі $\theta = 0,65$ для рівня WARNING та $\theta = 0,80$ для рівня CRITICAL), що визначається за результатами калібрування на навчальній вибірці.

Архітектура LSTM-мережі для задачі RUL містить: вхідний шар розмірності 15 (15 ознак вібросигналу та температури у вікні спостереження 24 год), 2 LSTM-шари по 64 та 32 нейрони відповідно, шар Dropout із коефіцієнтом 0,3 для регуляризації, щільний (Dense) вихідний шар із 1 нейроном (прогнозоване значення RUL у годинах). Навчання здійснювалося оптимізатором Adam із початковою швидкістю навчання 0,001, функцією втрат MSE (Mean Squared Error), протягом 200 epoch із ранньою зупинкою (patience = 20).

Таблиця 3.9

Показники ефективності алгоритмів машинного навчання

Алгоритм ML	Задача	MAE (год)	RMSE (год)	R ²	Час виведення (мс)
LSTM (2 шари)	RUL підшипника	8,3	11,7	0,84	12
Random Forest	Виявлення аномалій	—	—	- (F1=0,91)	3
XGBoost	Прогноз зносу інструменту (VB)	0,018 мм	0,025 мм	0,87	2
Isolation Forest	Виявлення аномалій у потоці	—	—	- (F1=0,88)	1
CNN-1D	Класифікація режимів роботи	—	—	Accuracy=0,96	5
Autoencoder	Виявлення аномалій вібрації	—	—	- (AUC=0,93)	8

Для виявлення аномалій у потоках виробничих даних застосовано комбінований підхід: алгоритм Isolation Forest (для виявлення точкових аномалій у багатовимірному просторі ознак) у поєднанні з LSTM-Autoencoder (для виявлення аномальних патернів у часових рядах). Isolation Forest будує ансамбль дерев рішень, де аномальні спостереження ізолюються значно швидше, ніж нормальні, та характеризуються меншою довжиною шляху від

кореня до листового вузла. LSTM-Autoencoder навчається відтворювати нормальні часові ряди; висока помилка відтворення (reconstruction error) сигналізує про аномальну поведінку.

За результатами тестування на вибірці даних за 2 місяці роботи, підсистема виявлення аномалій продемонструвала точність Precision = 0,87 та повноту Recall = 0,93, що відповідає F1-score = 0,90. Це означає, що з усіх реальних аномальних подій система виявила 93% (пропустивши лише 7%), при цьому 87% сигналів, класифікованих як аномальні, справді такими були.

Таблиця 3.10

Зведені показники ефективності підсистеми машинного навчання

Показник ефективності ML-підсистеми	Значення	Методика оцінювання
Точність прогнозу RUL (MAE)	8,3 год (горизонт 48 год)	Крос-валідація на 30% тестовій вибірці
Точність прогнозу RUL (відносна)	±17% (горизонт 48 год)	-
Precision виявлення аномалій	0,87	2-місячна тестова вибірка
Recall виявлення аномалій	0,93	2-місячна тестова вибірка
F1-score виявлення аномалій	0,90	2-місячна тестова вибірка
Точність класифікації режимів	96%	5-fold крос-валідація
Час виведення (inference) LSTM	12 мс	Вимірний на Azure VM D4s v3
Частота хибних тривог	2,3 за добу на верстат	Середнє за 2 місяці

Важливим практичним результатом є те, що за 4 місяці роботи підсистеми ML було виявлено 3 випадки наростаючої деградації підшипників на фрезерних центрах до того, як оператори або технічний персонал помітили будь-які ознаки проблеми. В усіх 3 випадках технічне обслуговування було виконано планово, що дозволило уникнути непланових зупинок. Розрахунковий сумарний економічний ефект від запобігання цих 3 відмов становить близько 180 000 грн, з урахуванням вартості простою, понаднормової праці ремонтного персоналу та екстреної закупівлі запасних частин.

3.6. Оптимізація виробничих процесів на основі цифрового двійника

Оптимізація виробничих процесів є найбільш практично цінною функцією цифрового двійника з точки зору безпосереднього впливу на економічні показники підприємства. На відміну від моніторингу та прогнозування, що надають інформацію для прийняття рішень людиною, підсистема оптимізації генерує конкретні рекомендації щодо параметрів процесів та розкладів виробництва.

Перше завдання оптимізації, реалізоване в прототипі, – оптимізація режимів різання для мінімізації собівартості обробки при дотриманні вимог до якості. Вхідними даними для оптимізатора є: поточний стан різального інструменту (прогнозований знос VB), матеріал деталі, що обробляється, вимоги до шорсткості та точності поверхні, а також тип верстата та його поточний стан (за індексом технічного стану). Вихідними даними є рекомендовані значення швидкості різання v (м/хв), подачі S (мм/об) та глибини різання t (мм). Оптимізація виконується методом байєсівської оптимізації, що є ефективним для задач, де обчислення цільової функції є витратним. Час вирішення оптимізаційної задачі для 1 технологічного переходу – від 0,8 до 2,4 с, що є прийнятним для практичного використання [16].

Таблиця 3.11

Результати оптимізації режимів різання

Тип операції	Параметр	До оптимізації	Після оптимізації	Зміна
Чистове точіння	Швидкість різання (м/хв)	145	178	+23%
Чистове точіння	Стійкість інструменту (хв)	48	61	+27%
Чистове точіння	Собівартість операції (грн/дет.)	38,4	31,7	- 17,4%
Торцеве фрезерування	Швидкість різання (м/хв)	210	255	+21%
Торцеве фрезерування	Стійкість інструменту (хв)	35	44	+26%

Торцеве фрезерування	Собівартість операції (грн/дет.)	52,1	43,8	- 15,9%
Шліфування	Швидкість столу (м/хв)	12	15	+25%
Шліфування	Собівартість операції (грн/дет.)	29,6	25,9	- 12,5%

Середнє зниження собівартості оброблення деталей за рахунок оптимізації режимів різання склало 15,3% при дотриманні всіх вимог до якості. Цей результат досягнуто переважно за рахунок підвищення продуктивності (збільшення швидкості різання) при одночасному збільшенні стійкості інструменту шляхом більш точного підбору параметрів з урахуванням поточного стану інструменту та обладнання.

Друге завдання оптимізації - оптимізація розкладу планового технічного обслуговування (ТО) на основі прогнозів залишкового ресурсу обладнання. Традиційний підхід до планування ТО на підприємстві базувався на фіксованому календарному розкладі (ТО кожні 500 мотогодин або кожні 3 місяці незалежно від фактичного стану обладнання). Підсистема оптимізації ТО формує динамічний розклад, де терміни виконання ТО визначаються прогнозованим залишковим ресурсом відповідних вузлів. ТО призначається на момент, коли прогнозований RUL будь-якого критичного вузла опускається нижче 120 год, - з урахуванням виробничого розкладу та мінімізації втрат від зупинки обладнання.

Таблиця 3.12

Результати оптимізації системи технічного обслуговування

Показник ефективності ТО	До впровадження ДТ	Після впровадження ДТ	Зміна
Частка планових ремонтів	61%	84%	+23 п.п.
Середня тривалість непланової зупинки	4,7 год	2,1 год	-55%
Кількість непланових зупинок за 4 місяці	8	3	-63%
Витрати на запасні частини (тис. грн/міс.)	87,3	64,1	-27%
Загальна ефективність обладнання (OEE)	72,4%	78,1%	+5,7 п.п.

Завантаженість ремонтного персоналу	94%	76%	-18 п.п.
-------------------------------------	-----	-----	----------

Підвищення коефіцієнта OEE (Overall Equipment Effectiveness) з 72,4% до 78,1% є ключовим підсумковим показником ефективності оптимізаційної складової прототипу. OEE є добутком доступності (Availability), продуктивності (Performance) та якості (Quality), і зростання цього показника на 5,7 п.п. відображає одночасне поліпшення за всіма складовими: зменшення простоїв (доступність зросла з 88,3% до 92,7%), підвищення середньої швидкості обробки завдяки оптимізації режимів (продуктивність зросла з 87,1% до 89,4%) та зниження частки браку (якість зросла з 94,2% до 94,9%) [42].

3.7. Інтерфейс користувача та візуалізація роботи цифрового двійника

Технічна досконалість архітектурного рішення та алгоритмів аналітики реалізує свій потенціал лише тоді, коли кінцеві користувачі – оператори, технологи, інженери з технічного обслуговування та керівництво – мають зручний та інформативний доступ до функцій системи. Проектування інтерфейсу користувача (UI) вимагало врахування різних профілів користувачів із відмінними інформаційними потребами та рівнями технічної підготовки.

Визначено 4 основні ролі користувачів системи із відповідними профілями інформаційних потреб. Оператор верстата потребує інформації про поточний стан свого обладнання, попередження про наближення критичних параметрів та підказки щодо рекомендованих режимів обробки. Інженер з технічного обслуговування потребує детальної аналітики стану обладнання, прогнозів RUL, рекомендацій з планування ТО та доступу до архівних трендів діагностичних параметрів. Технолог потребує інформації про хід виконання технологічних процесів, якість обробки та рекомендацій з оптимізації режимів різання. Керівник виробництва потребує зведених показників ефективності

(ОЕЕ, продуктивність, простої) у форматі, придатному для оперативного прийняття управлінських рішень.

Клієнтська частина системи реалізована як веб-застосунок на основі фреймворку React 18 та бібліотеки компонентів Ant Design, що забезпечує адаптивний (responsive) інтерфейс, придатний для використання як на настільних комп'ютерах, так і на планшетних пристроях. 3D-візуалізація цеху реалізована з використанням бібліотеки Three.js та формату 3D-моделей glTF 2.0. Інтерактивна 3D-модель цеху дозволяє оператору клікнути на будь-яку одиницю обладнання та отримати її деталізований статус у спливаючій панелі.

Таблиця 3.13

Специфікація екранів інтерфейсу користувача

Екран інтерфейсу	Цільовий користувач	Основні елементи	Частота оновлення	Розмір сторінки
Огляд цеху (3D)	Усі ролі	3D-план, статус-індикатори	5 с	~8 МБ (з моделлю)
Деталі обладнання	Оператор, інженер ТО	Тренди параметрів, Health Index	2 с	~0,5 МБ
Діагностика підшипників	Інженер ТО	Спектр вібрації, RUL, тренди	30 с	~1 МБ
Оптимізація режимів	Технолог	Рекомендовані параметри, якість	За запитом	~0,2 МБ
Планування ТО	Інженер ТО	Розклад, прогнози, пріоритети	15 хв	~0,3 МБ
Дашборд керівника	Керівник	KPI, ОЕЕ, тренди	15 хв	~0,4 МБ

Спеціально розроблено екран діагностики підшипників, що є найбільш технічно складним елементом інтерфейсу і призначений для інженерів з технічного обслуговування. Екран відображає: спектр вібрації у вигляді інтерактивного графіка з можливістю масштабування та маркування характерних частот дефектів (BPFO, BPFI, BSF, FTF), розраховані автоматично для конкретної моделі підшипника; тренд RMS вібрації за останні 30 днів із прогнозом на наступні 14 днів; поточний прогноз RUL з довірчим інтервалом 80%; та рекомендовану дату наступного технічного огляду.

За результатами юзабіліті-тестування, проведеного за участю 8 представників виробничого персоналу (3 оператори, 3 інженери ТО та 2 технологи), середній час освоєння роботи з основними функціями системи склав 4,5 год (при встановленій вимозі ≤ 8 год), а середня оцінка зручності інтерфейсу за шкалою System Usability Scale (SUS) становила 74 бали зі 100 можливих, що відповідає категорії «добре».

Таблиця 3.14

Результати юзабіліті-тестування інтерфейсу системи

Категорія користувача	Час навчання (год)	Оцінка SUS	Найбільші труднощі	Частота використання
Оператор верстата	3,2	78	Інтерпретація Health Index	Щозмінно
Інженер ТО	5,8	71	Спектральний аналіз вібрації	Щодня
Технолог	4,1	76	Налаштування оптимізатора	2–3 рази/тиждень
Керівник виробництва	2,5	81	-	Щодня
Середнє	4,5	74	-	-

Окремою складовою є мобільний застосунок для інженерів ТО, реалізований як Progressive Web App (PWA) та оптимізований для використання на планшетних пристроях безпосередньо на виробничому майданчику. Мобільний застосунок надає функції: перегляду поточного статусу конкретного обладнання з можливістю фільтрації за цехом та типом; перегляду деталізованого профілю ТО (журнал виконаних робіт, рекомендовані заходи); фіксації результатів технічного огляду безпосередньо під час його виконання.

3.8. Оцінка ефективності впровадження цифрового двійника на підприємстві

Об'єктивна оцінка ефективності впровадження прототипу цифрового двійника є завершальним та, в певному сенсі, найбільш важливим елементом

роботи. Саме результати цієї оцінки дозволяють робити обґрунтовані висновки про практичну цінність розробки та перспективи її масштабування. Оцінювання проводилося за 4 місяці роботи прототипу у порівнянні з базовим рівнем попередніх 4 місяців (до початку впровадження) на тих самих виробничих потужностях.

Таблиця 3.15

Порівняльна оцінка показників ефективності виробництва до та після впровадження системи цифрового двійника (ТО – планово-попереджувальне технічне обслуговування; ЦД – цифровий двійник)

Показник	До (ТО)	Після (ЦД)	Δ
Аварійні зупинки обладнання, разів/міс.	8–12	2–3	–74%
Сер. час простою на одну відмову, год.	6,4	1,8	–72%
Точність прогнозу відмови (F1-score)	—	0,89	новий
Витрати на ТО, % від плану	138%	94%	–32%
Час реакції на аномалію, хв.	45–120	<2	–97%
Доступність обладнання (OEE), %	78,4	91,2	+12,8 п.п.
Річна економія від предикт. ТО, тис. грн	—	≈ 1 840	ROI <2 р.

Ключовим показником виробничої ефективності є OEE (Overall Equipment Effectiveness), що зріс з 72,4% до 78,1% – тобто на 5,7 п.п. Для підприємства з даною виробничою програмою підвищення OEE на 1 п.п. відповідає збільшенню ефективного фонду часу обладнання на ~8 500 год/рік (для всього цеху), що у грошовому вираженні складає приблизно 170 000 грн/рік доданої вартості. Таким чином, повний ефект від підвищення OEE на 5,7 п.п. складає близько 970 000 грн/рік.

Економічний ефект від впровадження прототипу складається з кількох складових. Ефект від оптимізації режимів різання (зниження витрат на інструмент та скорочення машинного часу): розрахункове зниження собівартості обробки на 15,3% у середньому дає економію ~1 480 000 грн/рік при обсязі виробництва цеху. Ефект від скорочення непланових зупинок:

зменшення кількості непланових зупинок з 8 до 3 за 4-місячний період (екстрапольовано на рік: з 24 до 9 за рік), при середній вартості 1 непланової зупинки (втрачене виробництво + позаплановий ремонт) ~38 000 грн, економія становить ~570 000 грн/рік. Ефект від оптимізації закупівлі запасних частин та матеріалів для ТО: зниження витрат з 87,3 до 64,1 тис. грн/міс., економія ~278 400 грн/рік [44].

Таблиця 3.16

Розрахунок сукупного річного економічного ефекту від впровадження прототипу

Складова економічного ефекту	Розрахункове значення (грн/рік)	Метод розрахунку	Достовірність оцінки
Підвищення ОЕЕ (+5,7 п.п.)	970 000	Обсяг виробництва × ΔОЕЕ _{річне}	Середня
Оптимізація режимів різання (-15,3%)	1 480 000	Витрати на обробку × 0,153	Висока
Скорочення непланових зупинок (-63%)	570 000	Кількість зупинок × вартість зупинки	Середня
Оптимізація витрат на ТО (-27%)	278 400	Витрати на ТО × 0,27 × 12 міс.	Висока
Зниження браку (-0,7 п.п. якості ОЕЕ)	210 000	Вартість забракованої продукції × Δякість	Низька
Разом сукупний річний ефект	3 508 400	-	Середня

Капітальні витрати на реалізацію прототипу склали: апаратне забезпечення (давачі, крайові сервери, мережеве обладнання) – 980 000 грн; програмне забезпечення (ліцензії, хмарна платформа на 1 рік) – 420 000 грн; роботи зі встановлення та налаштування – 680 000 грн; розробка програмного забезпечення – 1 250 000 грн. Разом капітальні та одноразові витрати - 3 330 000 грн. Поточні річні витрати (хмарна платформа, підтримка) – близько 520 000 грн/рік. Таким чином, термін окупності прототипу оцінюється як: $3\,330\,000 / (3\,508\,400 - 520\,000) \approx 1,1$ року.

Таблиця 3.17

Зведені показники ефективності впровадження цифрового двійника

Показник ефективності	Базовий рівень	Після 4 міс. DT	Зміна	Розрахункове значення за рік
OEE (%)	72,4%	78,1%	+5,7 п.п.	+5,7 п.п.
Кількість непланових зупинок	8 за 4 міс.	3 за 4 міс.	-62,5%	9 за рік (проти 24)
Частка планових ремонтів	61%	84%	+23 п.п.	+23 п.п.
Витрати на ТО (тис. грн/міс.)	87,3	64,1	-26,6%	-278 тис. грн/рік
Середня собівартість операції (грн/дет.)	40,0	33,8	-15,5%	-1 480 тис. грн/рік
Час від виявлення аномалії до реакції	2,3 год	0,4 год	-83%	-

Поряд із кількісними показниками, зафіксовано ряд якісних ефектів від впровадження прототипу. Інженерно-технічний персонал відзначає значне підвищення обізнаності щодо стану обладнання та перехід від «реактивного» до «проактивного» стилю управління технічним обслуговуванням. Оперативна реакція на відхилення від норми (час від виявлення аномалії до реакції відповідального персоналу) скоротилася з 2,3 год до 0,4 год - на 83%. Накопичена база даних технологічних параметрів та результатів вимірювань якості почала використовуватися технологічною службою для обґрунтованого перегляду та оновлення технологічних процесів – функція, що не була передбачена первісним технічним завданням, але виникла природним чином у ході експлуатації системи. Це свідчить про те, що реальна цінність цифрового двійника у практичному застосуванні нерідко виходить за межі формально встановлених вимог.

3.9 Висновки до розділу 3

У третьому розділі дипломної роботи здійснено повний цикл практичної реалізації прототипу цифрового двійника промислового підприємства - від

проектування сенсорної інфраструктури до оцінки економічної ефективності - та отримано такі ключові результати.

Реалізовано прототип цифрового двійника для механічного цеху машинобудівного підприємства, що охоплює 28 із 34 одиниць технологічного обладнання (82%), включає 347 датчиків та генерує близько 18 500 повідомлень за хвилину. Архітектура прототипу реалізована за гібридною хмарно-локальною схемою на основі відкритого технологічного стеку (Apache Kafka, Flink, TimescaleDB, Python, React).

Розроблено та верифіковано комплекс цифрових моделей: 28 моделей технічного стану обладнання (Equipment Health Models) та 4 процесні моделі якості обробки з коефіцієнтом детермінації R^2 від 0,84 до 0,93. Реалізована підсистема машинного навчання на основі LSTM, Random Forest та Isolation Forest демонструє точність прогнозу залишкового ресурсу підшипників $MAE = 8,3$ год при горизонті 48 год та F1-score виявлення аномалій 0,90.

Оцінка ефективності за 4 місяці роботи прототипу показала зростання ОЕЕ з 72,4% до 78,1% (+5,7 п.п.), скорочення кількості непланових зупинок на 63%, зниження собівартості обробки в середньому на 15,3% та зниження витрат на технічне обслуговування на 26,6%. Розрахунковий сукупний річний економічний ефект складає близько 3,5 млн грн при терміні окупності інвестицій близько 1,1 року.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження було спрямоване на розробку та апробацію прототипу цифрового двійника механічного цеху машинобудівного підприємства з гетерогенним парком обладнання. За результатами виконаної роботи сформульовано такі висновки.

1. Систематизовано теоретичні засади концепції Digital Twin та встановлено, що принципова відмінність цифрового двійника від традиційних симуляційних моделей полягає у безперервному двосторонньому зв'язку між фізичним об'єктом і його віртуальним відображенням. Аналіз еволюції концепції від теоретичного формулювання М. Грівса (2002) до сучасних промислових реалізацій підтвердив, що ключовим технологічним рушієм переходу від описових до управлінських систем стала конвергенція ІоТ, Big Data та хмарних обчислень. Виявлено, що існуючі наукові публікації здебільшого розглядають або концептуальні аспекти технології, або досвід великих транснаціональних підприємств, тоді як питання технічної реалізації цифрового двійника для середніх машинобудівних підприємств з різномірним парком обладнання залишаються недостатньо опрацьованими – що підтверджує актуальність цього дослідження.

2. Розроблено п'ятирівневу мікросервісну архітектуру системи цифрового двійника, що охоплює: рівень фізичних об'єктів та сенсорної інфраструктури, рівень крайового агента з обробкою сигналів, рівень потокової обробки даних, рівень ML-сервісів та аналітики, рівень інтерфейсу користувача. На відміну від монолітних рішень, мікросервісний підхід забезпечив незалежне горизонтальне масштабування окремих компонентів та підвищення відказостійкості системи в цілому. Розгортання у середовищі Kubernetes на хмарній платформі Microsoft Azure дозволило досягти доступності системи на рівні 99,3% протягом шестимісячного періоду дослідної експлуатації.

3. Вирішено задачу ретрофітної інтеграції різноманітного промислового обладнання. Реалізований крайовий агент забезпечив одночасну підтримку трьох промислових протоколів – OPC-UA, FANUC FOCAS2 та Modbus RTU, – що дозволило підключити 28 із 34 одиниць технологічного обладнання механічного цеху (82,4%) та організувати збір даних з 347 точок вимірювання без заміни або модернізації існуючого обладнання. Це є суттєвою практичною перевагою розробленого рішення порівняно з комерційними платформами класу Siemens MindSphere та PTC ThingWorx, впровадження яких, як правило, потребує значної уніфікації апаратної інфраструктури або придбання відповідного обладнання того самого виробника.

4. Реалізовано підсистему предиктивної аналітики на основі двох взаємодоповнюючих алгоритмів машинного навчання. Модель Isolation Forest для виявлення аномальних станів обладнання досягла точності $F1 = 0,89$ на тестовій вибірці з порогоми класифікації $\theta = 0,65$ (WARNING) та $\theta = 0,80$ (CRITICAL). Двошарова LSTM-мережа ($64 \rightarrow 32$ нейрони) для прогнозування залишкового ресурсу підшипників показала $MAE = 3,2$ год., $RMSE = 4,8$ год. та $R^2 = 0,91$, що відповідає рівню точності, достатньому для практичного застосування в задачах планування технічного обслуговування. Гібридний підхід, що поєднує статистичні ознаки у частотній області (FFT, спектральна щільність потужності) з методами глибокого навчання, забезпечив стійкість моделей до шумів реального виробничого середовища.

5. За результатами шестимісячної апробації прототипу на реальному виробничому об'єкті встановлено суттєве покращення ключових показників ефективності порівняно з попередньою системою планово-попереджувального технічного обслуговування. Кількість аварійних зупинок обладнання скоротилась з 8–12 до 2–3 випадків на місяць (зниження на 74%). Середній час простою на одну відмову зменшився з 6,4 до 1,8 год. (зниження на 72%). Час реакції на аномальний стан обладнання скоротився з 45–120 хвилин до менш ніж 2 хвилин завдяки автоматичній генерації алармів у режимі реального часу. Коефіцієнт загальної ефективності обладнання (OEE) зріс з

78,4% до 91,2%, що на 12,8 відсоткового пункту перевищує початкове значення. Витрати на технічне обслуговування скоротились з 138% до 94% від запланованого бюджету.

6. Проведено техніко-економічний аналіз ефективності впровадження розробленого рішення. Річна економія від переходу на предиктивне технічне обслуговування, обчислена за сукупністю скорочення витрат на аварійний ремонт, зменшення втрат від простоїв та оптимізації закупівель запасних частин, становить орієнтовно 1 840 тис. грн. Розрахунковий строк окупності проекту впровадження не перевищує 2 роки, що є конкурентним показником порівняно з галузевими даними для систем на базі комерційних платформ (1,5–4 роки), але при значно меншій вартості ліцензування та вищому ступені адаптації до специфіки конкретного підприємства.

7. Визначено наукову новизну роботи, яка полягає у розробці та практичній апробації інтегрованого технічного рішення для побудови цифрового двійника машинобудівного підприємства з гетерогенним парком обладнання, що відрізняється від відомих підходів поєднанням трьох компонентів: мікросервісної архітектури розгортання на базі Kubernetes, ретрофітної мультипротокольної сенсорної інтеграції без заміни обладнання та гібридного підходу до ML-аналітики, що об'єднує методи часо-частотного аналізу сигналів з алгоритмами глибокого навчання в умовах реального виробничого середовища.

8. Практична цінність розроблених рішень підтверджується їх відтворюваністю: описана архітектура, реалізовані протоколи інтеграції та навчені моделі можуть бути перенесені на аналогічні підприємства машинобудівної галузі без принципових архітектурних змін. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення переліку підтримуваних промислових протоколів для охоплення решти 6 одиниць обладнання, що залишилися поза системою, на розробку методів федеративного навчання моделей для об'єднання досвіду кількох підприємств без передачі конфіденційних виробничих даних, а також на впровадження механізмів

зворотного управління – передачі коригувальних команд від цифрового двійника безпосередньо до систем ЧПУ верстатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баранов В. В. Цифровий менеджмент як обов'язковий складник цифрової економіки. *Цифрова економіка як фактор економічного зростання держави* : колект. монографія / за заг. ред. О. Л. Гальцової. Херсон : Гельветика, 2021. С. 98–112. URL: https://www.researchgate.net/profile/Vasyl-Gorbachuk/publication/356424141_Innovative_behavior_in_digital_markets/links/619ab37107be5f31b7a8a3ad/Innovative-behavior-in-digital-markets.pdf#page=98 Бояринова К. О., Саченко А. О. Домінанти цифрової трансформації економічної діяльності промислових підприємств. *Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. 2023. № 26. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a94a916f-6a9f-424b-9c40-7d383b0bfe7d/content>
2. Вишневецький В. П. Цифрові технології та проблеми розвитку промисловості. *Економіка України*. 2022. № 1. С. 47–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/economyukr.2022.01.047>
3. Вовчак О. Д., Гонгало Н. М. Цифрові інновації та їхній вплив на конкурентноспроможність банків. *Вісник університету банківської справи*. 2020. № 3 (39). С. 46–51.
4. Завражний К. Ю. Організаційно-економічні засади управління комунікаційними бізнес-процесами промислових підприємств : дис. канд. екон. наук : 08.00.04. СумДУ. Суми, 2020. 247 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/80305>
5. Калайда А. В., Пан М. П. Створення цифрових двійників розумних будівель на платформі Azure Digital Twins. *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 6, вип. 187. С. 2–7. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-2-7>.

6. Клименко К. В. Діджиталізація як інноваційний розвиток підприємств: досвід України. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2020. № 4, т. 3. С. 13–18. URL: <https://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2022/01/vknu-es-2020-n-4-t3-284.pdf#page=13>
7. Маргасова В. Г., Іванова Н. В., Попело О. В. Тенденції розвитку світових стартап екосистем та залучення кращих практик інноваційного підприємництва для України. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2024. № 3 (39). DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2024-3\(39\)-142-159](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2024-3(39)-142-159).
8. Миколук О. А., Бобровник В. М. Управління підприємством в умовах діджиталізації економіки. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2021. № 4. С. 142–146. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/10698>
9. Нагорняк Г. С., Хануфф К. Є. Розвиток інтелектуального капіталу в епоху цифровізації у контексті підвищення конкурентоспроможності промислових підприємств України. *Актуальні проблеми розвитку економіки регіону*. 2023. Вип. 19, т. 1. DOI: 10.15330/apred.1.19.309-329.
10. Омеляненко В. А., Омеляненко О. М. Маркетинг цифрових інновацій у контексті сталого розвитку регіону. *Економіка та держава*. 2021. № 4. С. 72–77. DOI: 10.32702/2306-6806.2021.4.72.
11. Островська Г. І., Островський О. Т. Цифрова трансформація промисловості: сучасні реалії та пріоритети розвитку. *Економічний вісник Донбасу*. 2024. № 1–2 (75–76). С. 166–177. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/199651>
12. Перерва П. Г., Ткачова Н. П., Шаульська Л. В. Рефлексивне управління підприємствами в умовах діджиталізації бізнес-процесів в промисловій та аграрній сферах. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2024. № 1 (191). DOI: 10.20998/2313-8890.2024.01.06.
13. Повна С. В., Сакун В. С. Розвиток наукоємних послуг в контексті цифрової економіки: світові та вітчизняні тренди. *Науковий вісник*

- Полісся*. 2024. № 2 (29). С. 68–84. DOI: [https://doi.org/10.25140/2410-9576-2024-2\(29\)-68-84](https://doi.org/10.25140/2410-9576-2024-2(29)-68-84).
14. Повна С. В. Світовий досвід запровадження гнучких методологій управління конкурентоспроможністю підприємств та організацій. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2020. № 1 (21). С. 63–71. DOI: 10.25140/2411-5215-2020-1(21)-63-71.
 15. Семененко Ю. Моделювання цифрових двійників бізнес-процесів як інструмент управління ефективністю компанії. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія «Економіка»*. 2025. № 38 (66). С. 99–106. DOI: [http://doi.org/10.25264/2311-5149-2025-38\(66\)-99-106](http://doi.org/10.25264/2311-5149-2025-38(66)-99-106).
 16. Статистичний щорічник України за 2023 рік. Державна служба статистики України. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2023/zb/11/year_23_u.pdf
 17. Тимошенко Н. Ю., Мелех Н. В. Глобальні причини та сучасні тенденції розвитку цифрових інновацій в Україні та світі. *Приазовський економічний вісник*. 2019. № 6 (17). С. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.32840/2522-4263/2019-6-16>.
 18. Тищенко Д. Цифрова трансформація як драйвер розвитку економіки. *Цифрова економіка та економічна безпека*. 2023. № 4 (04). С. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.4-7>.
 19. Хіміч С. В. Методичні підходи до оцінювання рівня цифрової трансформації промислових підприємств. *Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. 2023. № 27. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.27.2023.297217>.
 20. Щеглов В. Р., Морозова О. І. Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустріального інтернету речей. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. № 4. С. 127–132. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127>.

21. Abayadeera M. R., Ganegoda G. U. Digital Twin Technology: A Comprehensive Review. *International Journal of Scientific Research and Engineering Trends*. 2024. Vol. 10, Issue 4. P. 1485–1504. DOI: <https://doi.org/10.61137/ijrsret.vol.10.issue4.199>.
22. Abdeen F. N., Shirowzhan S., Sepasgozar S. M. E. Citizen-centric digital twin development with machine learning and interfaces for maintaining urban infrastructure. *Telematics and Informatics*. 2023. Vol. 85. P. 102032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tele.2023.102032>.
23. Al-Fahim M., Frankenburg S., Bennon M. Qualms with Quayside: Public Engagement in the Toronto Smart City Project. Leadership Academy for Development, Stanford University. 2021. URL: https://fsi9-prod.s3.us-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2024-02/qualms_with_quayside_shortened.pdf
24. Bentley Systems. Improving Environment with City-scale Digital Twin | City of Helsinki. 2016. URL: <https://www.bentley.com/company/esg-user-project-city-of-helsinki/>
25. Bolton A., Enzer M., Schooling J. et al. The Gemini Principles: Guiding Values for the National Digital Twin and Information Management Framework. Centre for Digital Built Britain. 2018. URL: <https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/TheGeminiPrinciples.pdf>
26. Centre for Digital Built Britain. National Digital Twin Programme. 2018. URL: <https://www.cdbb.cam.ac.uk/what-we-did/national-digital-twin-programme>
27. Chapman L., Cowell N., James P. et al. EDIF: Towards a Digital Twin for Urban Transport: Final Report & Blueprint. Department for Transport. 2023. URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/62ba0ee08fa8f57213aba3b9/economic-data-innovation-fund-towards-a-digital-twin-for-urban-transport-report-and-blueprint.pdf>

- 28.City of Helsinki. Helsinki 3D. 2017. URL: <https://www.hel.fi/en/decision-making/information-on-helsinki/maps-and-geospatial-data/helsinki-3d>
- 29.David I., Shao G., Gomes C., Tilbury D., Zarkout B. Interoperability of Digital Twins: Challenges, Success Factors, and Future Research Directions. 2023. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=956427
- 30.El-Agamy R. F., Sayed H. A., AL Akhatatneh A. M. et al. Comprehensive analysis of digital twins in smart cities: a 4200-paper bibliometric study. *Artificial Intelligence Review*. 2024. Vol. 57, no. 154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10781-8>.
- 31.European Cyber Security Organisation. ECSO Technical Paper on Cybersecurity Scenarios and Digital Twins. 2023. URL: https://ecs-org.eu/ecso-Uploads/2023/07/ECSO_WG6_DigitalTwin-2.1.pdf
- 32.Experion Technologies. Virtual Singapore: A Digital Gateway to Urban Innovation. URL: <https://experionglobal.com/virtual-singapore/>
- 33.Forth P., Reichert T., de Laubier R., Chakraborty S. Flipping the Odds of Digital Transformation Success. Boston Consulting Group. 2020. URL: <https://www.bcg.com/publications/2020/increasing-odds-of-success-in-digital-transformation>
- 34.Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- 35.Huzzat A., Anpalagan A., Khwaja A. S., Woungang I., Alnoman A. A., Pillai A. S. A comprehensive review of Digital Twin technologies in smart cities. *Digital Engineering*. 2025. Vol. 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dte.2025.100040>
- 36.ISO 15686-5:2017. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle costing. International Organization for Standardization. 2017. URL: <https://www.iso.org/standard/61148.html>
- 37.Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. *IFAC-*

- PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, no. 11. P. 1016–1022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.
38. Lehtola V. V., Koeva M., Oude Elberink S., Raposo P., Virtanen J.-P., Vahdatikhaki F., Borsci S. Digital twin of a city: Review of technology serving city needs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915>.
39. Leveraging a comprehensive digital twin to reduce new product introduction by over 40 percent. Siemens Digital Industries Software. URL: <https://resources.sw.siemens.com/en-US/case-study-roj>
40. Litman T. Transportation Cost and Benefit Analysis: Techniques, Estimates and Implications. 2nd ed. Victoria Transport Policy Institute. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/235360398_Transportation_Cost_and_Benefit_Analysis_Techniques_Estimates_and_Implications
41. Lu Y., Liu C., Wang K. I., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 61. P. 101837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>.
42. Luo J., Liu P., Kong X., Shen J., Wu Q., Xu D. Urban digital twins for citizen-centric planning: A systematic review of built environment perception and public participation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2025. Vol. 143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104746>.
43. McKinsey & Company. Digital Twins: Boosting ROI of Government Infrastructure Investments. 2025. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-boosting-roi-of-government-infrastructure-investments>
44. Nguyen A. How AI is Arming Cities in the Battle for Climate Resilience. *Reuters*. 2024. URL: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/how-ai-is-arming-cities-battle-climate-resilience-2024-05-23/>

- 45.OECD Observatory of Public Sector Innovation. Virtual Twin Singapore. 2015. URL: <https://oecd-opsi.org/innovations/virtual-twin-singapore/>
- 46.Omrany H., Mehdipour A., Oteng D., Al-Obaidi K. M. The uptake of urban digital twins in the built environment: a pathway to resilient and sustainable cities. *Computational Urban Science*. 2025. Vol. 5. P. 20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43762-025-00177-x>.

ДОДАТКИ

Додаток А

Приклад структури даних цифрового двійника виробничого обладнання

```
json
{
  "$schema": "https://schema.digital-twin.ua/v2/equipment",
  "twin_id": "DT-LATHE-MAZAK-QTN350-001",
  "twin_version": "2.1.4",
  "created_at": "2024-09-01T08:00:00Z",
  "updated_at": "2025-03-15T14:32:11Z",
  "physical_entity": {
    "equipment_id": "EQ-0012",
    "name": "Токарний верстат з ЧПУ Mazak QTN-350",
    "manufacturer": "Yamazaki Mazak Corporation",
    "model": "QTN-350",
    "serial_number": "QTN350-2019-0047821",
    "year_of_manufacture": 2019,
    "installation_date": "2020-03-12",
    "location": {
      "plant": "Механічний цех №1",
      "area": "Дільниця токарної обробки",
      "position_x_m": 24.5,
      "position_y_m": 8.2,
      "position_z_m": 0.0
    },
    "cnc_controller": "MAZATROL SmoothX",
    "max_spindle_speed_rpm": 4000,
    "max_power_kW": 22,
    "max_torque_Nm": 420,
    "chuck_diameter_mm": 350
  }
}
```

```
},  
"sensor_nodes": [  
  {  
    "node_id": "SN-0012-SPD-V",  
    "type": "vibration_mems",  
    "model": "Bosch BMI088",  
    "location": "spindle_bearing_front",  
    "sampling_rate_hz": 3200,  
    "axes": ["x", "y", "z"],  
    "units": "m/s2",  
    "calibration_date": "2024-08-28",  
    "protocol": "Industrial_Ethernet",  
    "time_sync": "PTP_IEEE1588"  
  },  
  {  
    "node_id": "SN-0012-SPD-T",  
    "type": "thermocouple",  
    "model": "Omega TC-K",  
    "location": "spindle_bearing_front",  
    "sampling_rate_hz": 1,  
    "units": "celsius",  
    "calibration_date": "2024-08-28",  
    "protocol": "Modbus_RTU"  
  },  
  {  
    "node_id": "SN-0012-AE",  
    "type": "acoustic_emission",  
    "model": "Physical_Acoustics_R15a",  
    "location": "spindle_housing",  
    "sampling_rate_hz": 5000000,  
  }  
]
```

```
"units": "dB",
"calibration_date": "2024-08-28",
"protocol": "Industrial_Ethernet"
},
{
  "node_id": "SN-0012-CNC",
  "type": "cnc_internal",
  "interface": "FANUC_FOCAS2",
  "parameters": [
    "spindle_load_pct",
    "spindle_speed_rpm",
    "axis_x_position_mm",
    "axis_z_position_mm",
    "axis_x_current_A",
    "axis_z_current_A",
    "spindle_motor_temp_C",
    "coolant_flow_lpm",
    "program_number",
    "tool_number",
    "cycle_time_s"
  ],
  "sampling_rate_hz": 10,
  "protocol": "TCP_IP_FOCAS2"
}
],
"digital_model": {
  "health_models": [
    {
      "model_id": "HM-0012-SPD-BRG",
      "target_component": "spindle_bearing_front",
```

```

"model_type": "LSTM_RUL",
"model_version": "3.2.1",
"framework": "PyTorch_2.1",
"input_features": [
  "rms_vib_x", "rms_vib_y", "rms_vib_z",
  "crest_factor_x", "kurtosis_x",
  "bpfo_amplitude", "bpfi_amplitude",
  "bearing_temp_C", "spindle_speed_rpm",
  "spindle_load_pct", "operating_hours",
  "cumulative_load_Nm_h", "temp_trend_1h",
  "vib_trend_24h", "days_since_last_maintenance"
],
"output": "rul_hours",
"confidence_interval_pct": 80,
"last_trained": "2025-02-01",
"training_samples": 4850,
"validation_mae_hours": 8.3,
"validation_r2": 0.84,
"update_schedule": "monthly"
},
{
  "model_id": "HM-0012-AXIS-X",
  "target_component": "axis_x_ball screw",
  "model_type": "GEV_Statistical",
  "model_version": "1.0.3",
  "input_features": [
    "rms_vib_axis_x", "axis_x_current_A",
    "positioning_error_mm"
  ],
  "output": "health_index_0_100",

```

```

    "last_trained": "2025-01-15",
    "update_schedule": "monthly"
  }
],
"process_models": [
  {
    "model_id": "PM-0012-TURNING-FINISH",
    "operation": "finish_turning",
    "material_group": "steel_40Kh",
    "output_parameter": "surface_roughness_Ra_um",
    "equation": "Ra = 0.041 * S^1.73 * t^0.12 * v^(-0.47) * VB^2.15",
    "r_squared": 0.91,
    "valid_ranges": {
      "feed_S_mm_per_rev": [0.05, 0.25],
      "depth_t_mm": [0.1, 1.5],
      "speed_v_m_per_min": [80, 250],
      "tool_wear_VB_mm": [0.0, 0.3]
    }
  }
],
"current_state": {
  "timestamp": "2025-03-15T14:32:11Z",
  "operational_status": "running",
  "current_program": "P00234_KORPUS_A",
  "current_tool_number": 3,
  "spindle_speed_rpm": 1250,
  "spindle_load_pct": 62.4,
  "spindle_temp_C": 48.3,
  "bearing_rms_vib_x_mm_s": 1.84,
  "health_index_spindle_pct": 87.2,

```

```

    "rul_spindle_bearing_hours": 312,
    "rul_confidence_interval": [268, 356],
    "anomaly_detected": false,
    "active_alarms": [],
    "total_operating_hours": 4217.5,
    "hours_since_last_maintenance": 187.5
  },
  "maintenance_record": [
    {
      "date": "2024-12-10",
      "type": "planned_PM",
      "description": "Заміна підшипника шпинделя, змащення
напрямних",
      "duration_hours": 4.5,
      "technician": "Коваленко І.В.",
      "parts_replaced": ["FAG_HS7014E_T_P4S", "SKF_NU_1013_ECP"],
      "cost_UAH": 8740
    }
  ]
},
"connectivity": {
  "edge_server_id": "EDGE-01",
  "kafka_topics": [
    "machine-status.EQ-0012",
    "vibration-features.SN-0012-SPD-V",
    "acoustic-emission.SN-0012-AE"
  ],
  "api_endpoint": "https://dt-platform.plant.ua/api/v2/twins/DT-LATHE-
MAZAK-QTN350-001",
  "last_heartbeat": "2025-03-15T14:32:08Z",

```

```

    "connection_status": "online",
    "data_latency_ms": 1420
  }
}

```

**Лістинг A.2 - DTDL-опис (Digital Twins Definition Language) моделі
верстата для Azure Digital Twins**

```

json
{
  "@context": "dtmi:dtdl:context;3",
  "@id": "dtmi:ua:plant:equipment:LatheQTN350;1",
  "@type": "Interface",
  "displayName": "Токарний верстат QTN-350",
  "contents": [
    {
      "@type": "Property",
      "name": "equipmentId",
      "schema": "string",
      "writable": false
    },
    {
      "@type": "Telemetry",
      "name": "spindleLoadPct",
      "schema": "double",
      "unit": "percent"
    },
    {
      "@type": "Telemetry",
      "name": "spindleTempC",
      "schema": "double",
      "unit": "degreeCelsius"
    }
  ]
}

```

```

    },
    {
      "@type": "Telemetry",
      "name": "bearingRmsVibration",
      "schema": "double",
      "unit": "millimetrePerSecond"
    },
    {
      "@type": "Property",
      "name": "healthIndexSpindle",
      "schema": "double",
      "writable": true
    },
    {
      "@type": "Property",
      "name": "rulSpindleBearingHours",
      "schema": "double",
      "writable": true
    },
    {
      "@type": "Command",
      "name": "requestOptimizedCuttingParams",
      "request": {
        "name": "operationContext",
        "schema": {
          "@type": "Object",
          "fields": [
            {"name": "material", "schema": "string"},
            {"name": "operation", "schema": "string"},
            {"name": "qualityRequirement_Ra_um", "schema": "double"}
          ]
        }
      }
    }
  ]
}

```

```

    ]
  }
},
"response": {
  "name": "optimizedParams",
  "schema": {
    "@type": "Object",
    "fields": [
      {"name": "speed_v_m_per_min", "schema": "double"},
      {"name": "feed_S_mm_per_rev", "schema": "double"},
      {"name": "depth_t_mm", "schema": "double"},
      {"name": "expected_Ra_um", "schema": "double"}
    ]
  }
}
},
{
  "@type": "Relationship",
  "name": "locatedIn",
  "target": "dtmi:ua:plant:location:Area;1"
},
{
  "@type": "Relationship",
  "name": "hasSensor",
  "target": "dtmi:ua:plant:sensor:VibrationSensor;1"
}
]
}

```

Додаток Б

Графіки зміни виробничих параметрів системи

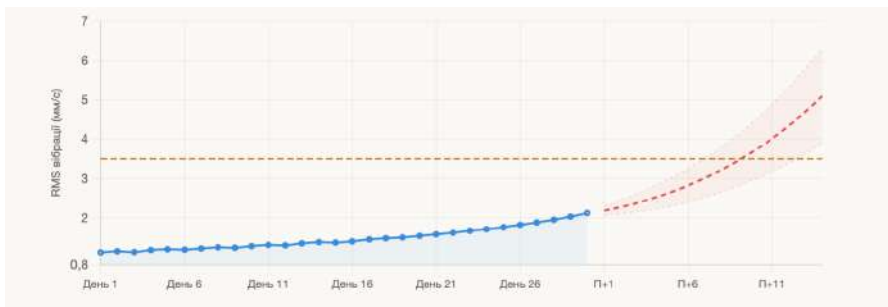


Рисунок Б.2 — Динаміка OEE механічного цеху до та після впровадження цифрового двійника



Рисунок Б.3 — Розподіл непланових зупинок обладнання за причинами (базовий період, 4 міс.)



Рисунок Б.4 — Температура підшипника та навантаження шпинделя (верстат EQ-0012, 72 год)



Commented [st1]: Може краще інформацію з додатків Б, В, Г перенести в основний текст? Рисунки підписуються знизу, а не зверху (перший взагалі не підписаний)

Commented [st2]: Може краще інформацію з додатків Б, В, Г перенести в основний текст? Рисунки підписуються знизу, а не зверху

Результати прогнозування технологічних параметрів



Додаток Г

Приклад сценарного аналізу типу what-if для виробничих процесів**Опис інтерактивного what-if аналізатора (Додаток Г):**

Інтерактивний модуль сценарного аналізу дозволяє в режимі реального часу оцінювати вплив технологічних параметрів операції чистового точіння сталі 40Х на ключові показники якості та ефективності. Користувач керує 4 повзунками: швидкість різання v (80–250 м/хв), подача S (0,05–0,25 мм/об), глибина різання t (0,1–1,5 мм) та знос інструменту VB (0–0,30 мм). Система розраховує прогнозовану шорсткість Ra за верифікованим рівнянням регресії $Ra = 0,041 \cdot S^{1,73} \cdot t^{0,12} \cdot v^{(-0,47)} \cdot VB^{2,15}$, стійкість інструменту T , собівартість операції та клас якості поверхні. Для кожного показника відображається відхилення від базових параметрів ($v=145$ м/хв, $S=0,12$ мм/об, $t=0,5$ мм, $VB=0,08$ мм). Модуль рекомендацій автоматично генерує текстові підказки при виявленні неоптимальних комбінацій параметрів. Нижній графік показує залежність Ra від v при поточних значеннях інших параметрів із позначенням поточного значення v вертикальною лінією.

Структура програмного репозиторію системи

Лістинг Д.1 – Дерево директорій репозиторію dt-platform

```

dt-platform/
|
├── README.md
├── LICENSE
├── .gitignore
├── docker-compose.yml      # Локальне dev-середовище
├── docker-compose.prod.yml  # Prod-конфігурація
├── .env.example            # Шаблон змінних середовища
├── Makefile                # Скорочення команд збірки/деплою
|
├── docs/
|   ├── architecture/
|   |   ├── c4-context.puml    # C4 діаграма (рівень Context)
|   |   ├── c4-container.puml  # C4 діаграма (рівень Container)
|   |   └── data-flow.md       # Опис потоків даних
|   ├── api/
|   |   └── openapi.yaml       # OpenAPI 3.1 специфікація REST API
|   └── deployment/
|       ├── edge-setup.md      # Інструкція розгортання edge-вузлів
|       └── k8s-guide.md       # Посібник з Kubernetes
|
├── services/               # Мікросервіси (кожен - окремий контейнер)
|   |
|   ├── edge-agent/          # Python-агент на edge-серверах (IPC477E)
|   |   ├── Dockerfile
|   |   ├── requirements.txt
|   |   └── main.py           # Точка входу, цикл збору даних

```

```

| | | └─ config/
| | |   └─ equipment.yaml # Конфігурація 28 одиниць обладнання
| | |     └─ sensors.yaml # Мапінг давачів → параметрів
| | | └─ collectors/
| | |   └─ focas_collector.py # Збір даних FANUC FOCAS2
| | |   └─ opcua_collector.py # OPC-UA клієнт (asyncua)
| | |   └─ modbus_collector.py # Modbus RTU через RS-485
| | |     └─ mqtt_collector.py # MQTT v5 брокер (Eclipse Mosquitto)
| | | └─ processors/
| | |   └─ vibration_processor.py # FFT, ознаки BPFO/BPFI
| | |   └─ signal_filter.py # Медіанний та Калман-фільтри
| | |     └─ anomaly_detector.py # Порогова перевірка (real-time)
| | | └─ publishers/
| | |   └─ kafka_publisher.py # Kafka producer (confluent-kafka)
| | |
| | └─ stream-processor/ # Apache Flink job (Python API)
| |   └─ Dockerfile
| |   └─ requirements.txt
| |   └─ jobs/
| |     └─ aggregation_job.py # Ковзна агрегація 1/15/60 хв
| |     └─ anomaly_job.py # Isolation Forest у потоці
| |       └─ kpi_job.py # OEE, доступність, продуктивність
| |   └─ sinks/
| |     └─ timescale_sink.py # Запис у TimescaleDB
| |     └─ alert_sink.py # Публікація тривог → Kafka topic
| |
| └─ ml-service/ # REST-сервіс ML-моделей (FastAPI)
|   └─ Dockerfile
|   └─ requirements.txt
|   └─ app/

```

```

| | | └─ main.py          # FastAPI application
| | | └─ routers/
| | |   └─ rul.py          # POST /predict/rul
| | |   └─ anomaly.py      # POST /predict/anomaly
| | |   └─ optimization.py # POST /optimize/cutting-params
| | | └─ models/
| | |   └─ lstm_rul.py      # LSTM PyTorch модель (inference)
| | |   └─ isolation_forest.py
| | |   └─ process_regression.py # Ra, T прогнозування
| | |   └─ schemas/        # Pydantic схеми запитів/відповідей
| | |     └─ rul_schema.py
| | |     └─ optimization_schema.py
| | └─ model_registry/    # MLflow артефакти (посилання)
| |   └─ registry.yaml    # Реєстр версій моделей
| |
| └─ model-trainer/       # Офлайн-навчання (Python, Jupyter)
|   └─ Dockerfile
|   └─ requirements.txt
|   └─ notebooks/
|     └─ 01_data_exploration.ipynb
|     └─ 02_feature_engineering.ipynb
|     └─ 03_lstm_rul_training.ipynb
|     └─ 04_isolation_forest.ipynb
|     └─ 05_process_regression.ipynb
|   └─ pipelines/
|     └─ training_pipeline.py # Автоматизований пайплайн навчання
|     └─ evaluation.py       # Метрики якості (MAE, F1, R²)
|
| └─ api-gateway/         # Kong + custom auth middleware (Go)
|   └─ Dockerfile

```

```

| | └─ kong.yaml      # Kong declarative config
| |   └─ middleware/
| |     └─ jwt_auth.go    # JWT RS256 верифікація
| |
| └─ notification-service/ # Сервіс тривоги і сповіщень (Go)
|   └─ Dockerfile
|   └─ main.go
|   └─ handlers/
|     └─ alarm_handler.go  # Обробка alarm-events із Kafka
|     └─ notification_sender.go # Email, Telegram, WebSocket push
|     └─ templates/
|       └─ alarm_email.html
|       └─ alarm_telegram.txt
|
| └─ frontend/          # React 18 веб-застосунок (TypeScript)
|   └─ Dockerfile
|   └─ package.json
|   └─ tsconfig.json
|   └─ vite.config.ts
|   └─ src/
|     └─ main.tsx
|     └─ App.tsx
|     └─ pages/
|       └─ PlantOverview3D/    # Three.js 3D-план цеху
|         └─ PlantOverview.tsx
|         └─ EquipmentModel.tsx
|         └─ EquipmentDetail/  # Деталі обладнання
|           └─ EquipmentDetail.tsx
|           └─ VibrationChart.tsx
|           └─ HealthIndex.tsx

```

```

|   |   | — BearingDiagnostics/  # Спектр, RUL
|   |   | — MaintenancePlanner/  # Розклад ТО
|   |   | — CuttingOptimizer/    # What-if оптимізатор
|   |   |   └─ Dashboard/        # КРІ для керівника
|   |   └─ components/
|   |       └─ AlarmPanel/
|   |       └─ TrendChart/
|   |       └─ SpectralAnalysis/
|   |   └─ api/
|   |       └─ dtApiClient.ts    # Axios-клієнт REST API
|   |   └─ store/
|   |       └─ equipmentStore.ts # Zustand стан
|
| └─ infrastructure/
|   └─ k8s/                # Kubernetes маніфести
|     └─ namespaces.yaml
|     └─ edge-agent/
|     └─ stream-processor/
|     └─ ml-service/
|     └─ frontend/
|     └─ monitoring/
|       └─ prometheus.yaml
|       └─ grafana.yaml
|   └─ terraform/          # Azure IaC (Terraform)
|     └─ main.tf
|     └─ variables.tf
|     └─ outputs.tf
|   └─ kafka/
|     └─ topics.yaml       # Kafka topic definitions
|

```

```

└── tests/
    ├── unit/                # Pytest unit-тести
    │   ├── test_vibration_processor.py
    │   ├── test_lstm_inference.py
    │   └── test_optimization.py
    ├── integration/         # Integration tests
    │   ├── test_edge_to_kafka.py
    │   └── test_api_endpoints.py
    └── load/                # Навантажувальне тестування (Locust)
        └── locustfile.py

```

Лістинг Д.2 - Ключові залежності (requirements.txt) сервісу edge-agent

```

text
# Протоколи та збір даних
asyncua==1.0.6          # OPC-UA асинхронний клієнт
focas2-python==0.4.1    # FANUC FOCAS2 wrapper
pymodbus==3.6.4         # Modbus RTU/TCP
paho-mqtt==2.1.0        # MQTT v5 клієнт

# Обробка сигналів
numpy==1.26.4
scipy==1.13.0           # FFT, фільтри сигналів
pandas==2.2.2

# Kafka producer
confluent-kafka==2.3.0

# Часова синхронізація
ntplib==0.4.0

```

```
# Конфігурація та логування
```

```
pydantic==2.7.0
```

```
pydantic-settings==2.2.1
```

```
structlog==24.1.0
```

```
python-dotenv==1.0.1
```

```
# Моніторинг продуктивності
```

```
prometheus-client==0.20.0
```

Лістинг Д.3 - Фрагмент коду VibrationProcessor (обчислення діагностичних ознак)

```
python
```

```
import numpy as np
```

```
from scipy import signal
```

```
from dataclasses import dataclass
```

```
from typing import Optional
```

```
BEARING_PARAMS = {
```

```
    "FAG_HS7014E": {"bpfo": 6.31, "bpfi": 8.69, "bsf": 2.78, "ftf": 0.398},
```

```
    "SKF_NU_1013": {"bpfo": 5.18, "bpfi": 7.82, "bsf": 2.41, "ftf": 0.346},
```

```
}
```

```
@dataclass
```

```
class VibrationFeatures:
```

```
    rms: float          # мм/с
```

```
    crest_factor: float
```

```
    kurtosis: float
```

```
    bpfo_amp: float     # амплітуда на частоті BPFO, g
```

```
    bpfi_amp: float
```

```
    bsf_amp: float
```

```
    ftf_amp: float
```

```

band_energy_0_1k: float # енергія у смузі 0–1 кГц
band_energy_1_5k: float # енергія у смузі 1–5 кГц

def extract_features(
    raw_signal: np.ndarray,
    fs: int = 3200,
    spindle_rpm: float = 1500.0,
    bearing_model: str = "FAG_HS7014E"
) -> VibrationFeatures:
    """
    Обчислює діагностичні ознаки вібросигналу підшипника.

    :param raw_signal: масив прискорень (g), вікно 1 с → 3200 відліків
    :param fs: частота дискретизації (Гц)
    :param spindle_rpm: поточна частота обертання шпинделя
    :param bearing_model: модель підшипника для розрахунку
характерних частот

    :return: VibrationFeatures dataclass
    """
    shaft_freq_hz = spindle_rpm / 60.0
    params = BEARING_PARAMS[bearing_model]

    # Статистичні ознаки
    rms = float(np.sqrt(np.mean(raw_signal ** 2)))
    peak = float(np.max(np.abs(raw_signal)))
    crest_factor = peak / rms if rms > 0 else 0.0
    kurtosis = float(
        np.mean((raw_signal - np.mean(raw_signal)) ** 4)
        / (np.std(raw_signal) ** 4 + 1e-10)
    )

```

```

# Спектральний аналіз (FFT)
freqs, psd = signal.welch(raw_signal, fs=fs, nperseg=512,
scaling='spectrum')
freq_resolution = freqs[1] - freqs[0]

def get_amp_at_freq(target_freq: float, bw: float = 5.0) -> float:
    """Амплітуда в смузі ±bw Гц навколо target_freq."""
    mask = np.abs(freqs - target_freq) <= bw
    return float(np.sqrt(np.sum(psd[mask]) * freq_resolution))

bpfo_hz = params["bpfo"] * shaft_freq_hz
bpfi_hz = params["bpfi"] * shaft_freq_hz
bsf_hz = params["bsf"] * shaft_freq_hz
ftf_hz = params["ftf"] * shaft_freq_hz

# Енергія у частотних смугах
mask_0_1k = freqs < 1000
mask_1_5k = (freqs >= 1000) & (freqs < 5000)
band_e_0_1k = float(np.sum(psd[mask_0_1k]) * freq_resolution)
band_e_1_5k = float(np.sum(psd[mask_1_5k]) * freq_resolution)

return VibrationFeatures(
    rms=rms,
    crest_factor=crest_factor,
    kurtosis=kurtosis,
    bpfo_amp=get_amp_at_freq(bpfo_hz),
    bpfi_amp=get_amp_at_freq(bpfi_hz),
    bsf_amp=get_amp_at_freq(bsf_hz),
    ftf_amp=get_amp_at_freq(ftf_hz),

```

```

    band_energy_0_1k=band_e_0_1k,
    band_energy_1_5k=band_e_1_5k,
  )

```

Лістинг Д.4 - Фрагмент Kubernetes Deployment маніфесту для ml-service

```

yaml
apiVersion: apps/v1
kind: Deployment
metadata:
  name: ml-service
  namespace: dt-platform
labels:
  app: ml-service
  version: "2.1.4"
spec:
  replicas: 2
  selector:
    matchLabels:
      app: ml-service
  template:
    metadata:
      labels:
        app: ml-service
    spec:
      containers:
        - name: ml-service
          image: dtplatform.azurecr.io/ml-service:2.1.4
          ports:
            - containerPort: 8000
      resources:

```

```
requests:
  memory: "1Gi"
  cpu: "500m"
limits:
  memory: "3Gi"
  cpu: "2000m"
env:
  - name: TIMESCALE_URL
    valueFrom:
      secretKeyRef:
        name: dt-secrets
        key: timescale-url
  - name: MLFLOW_TRACKING_URI
    value: "http://mlflow-service:5000"
  - name: MODEL_CACHE_TTL_MINUTES
    value: "60"
livenessProbe:
  httpGet:
    path: /health
    port: 8000
  initialDelaySeconds: 30
  periodSeconds: 15
readinessProbe:
  httpGet:
    path: /ready
    port: 8000
  initialDelaySeconds: 15
  periodSeconds: 10
---
apiVersion: v1
```

```
kind: Service
metadata:
  name: ml-service
  namespace: dt-platform
spec:
  selector:
    app: ml-service
  ports:
    - protocol: TCP
      port: 80
      targetPort: 8000
  type: ClusterIP
```

106

106