

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ»

Факультет інформатики · Кафедра інформатики

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Технічні та прикладні аспекти створення цифрових двійників промислових підприємств

Виконав: Майстер Іван Сергійович

Спеціальність: F2 Інженерія програмного забезпечення

Науковий керівник: к.т.н., доцент Савченко Т. В.

Київ · 2026

Актуальність дослідження

Чому цифрові двійники — це ключова технологія Industry 4.0

>40%

щорічне зростання глобального ринку
Digital Twin

млрд

\$150+

прогнозна вартість ринку до 2030 року

Industry

4.0

технологічна база: IIoT, Big Data, AI, хмари



Проблема дослідження

Відсутній систематизований підхід до проектування та впровадження цифрових двійників для середніх машинобудівних підприємств із гетерогенним парком обладнання, що враховував би як технічні вимоги до архітектури, так і прикладні аспекти інтеграції у реальні виробничі середовища.

Мета, об'єкт, предмет дослідження



МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Здійснити комплексний аналіз технічних та прикладних аспектів створення цифрових двійників промислових підприємств, визначити ключові архітектурні компоненти таких систем та розробити прототип з оцінкою ефективності його впровадження.



ОБ'ЄКТ

Процес створення та функціонування цифрових двійників промислових підприємств як інтегрованих кіберфізичних систем управління виробництвом.



ПРЕДМЕТ

Технічні рішення, архітектурні підходи, інструментальні засоби та прикладні методики проектування і впровадження Digital Twin у промисловому середовищі.

Завдання дослідження

1

Дослідити теоретичні засади та еволюцію концепції Digital Twin у промисловості

2

Систематизувати підходи до архітектурного проектування цифрових двійників

3

Проаналізувати технологічний стек та програмно-апаратне забезпечення

4

Формалізувати задачі моніторингу, прогнозування (RUL) та оптимізації виробництва

5

Розробити архітектуру та реалізувати прототип цифрового двійника механічного цеху

6

Оцінити ефективність прототипу за технічними та економічними показниками

Концепція цифрового двійника

Принципова відмінність — безперервний двосторонній зв'язок із фізичним об'єктом

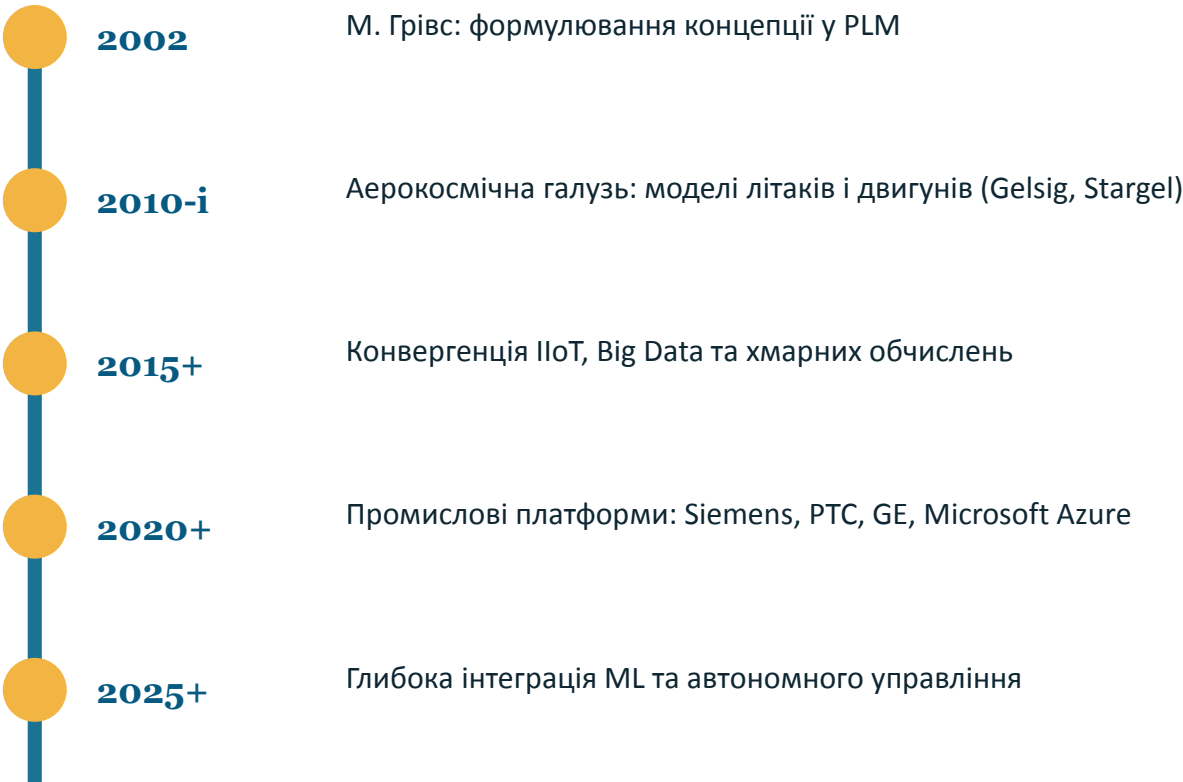
ВИЗНАЧЕННЯ

Цифровий двійник — це віртуальна модель фізичного об'єкта, системи або процесу, що функціонує в режимі реального часу та здатна відображати поточний стан свого матеріального аналога з високим ступенем точності.

Засновник концепції

Майкл Грівс (Michael Grieves), 2002 — у рамках управління життєвим циклом продукту (PLM)

Еволюція концепції



П'ятирівнева мікросервісна архітектура

Розгортання у Kubernetes на Microsoft Azure · Доступність 99,3%

5	 Рівень застосунків та сервісів Веб-дашборди, 3D-візуалізація цеху, мобільний застосунок, API	React · REST API · Grafana
4	 Рівень сховища та моделей Часові ряди, метадані, навчені ML-моделі, рушій цифрових моделей	TimescaleDB · PostgreSQL · MinIO · MLflow
3	 Рівень інтеграції та потокової обробки Маршрутизація, агрегація, виявлення аномалій у реальному часі	Apache Kafka · Apache Flink
2	 Рівень крайових обчислень (Edge) Агрегація даних, фільтрація, миттєва реакція на аномалії	OPC-UA · MQTT · протокольні конвертери
1	 Рівень фізичних активів Технологічне обладнання, давачі (347 точок), PLC, ЧПУ	OPC-UA · Modbus · FANUC FOCAS2

Технологічний стек платформи

Відкриті рішення · Незалежність від постачальника · Горизонтальне масштабування



Apache Kafka

Брокер повідомлень



Apache Flink

Потокова обробка



TimescaleDB

Часові ряди



PostgreSQL

Метадані, конфіги



Three.js

3D-візуалізація цеху



MLflow + Python

ML-платформа



Microsoft Azure

Хмарна платформа



**Docker +
Kubernetes**

Контейнеризація

Принцип вибору: open-source стек без vendor lock-in, що забезпечує адаптацію до конкретного підприємства та значно нижчу вартість ліцензування порівняно з Siemens MindSphere / PTC ThingWorx.

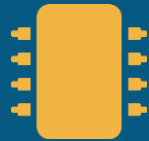
Реалізація прототипу

Механічний цех машинобудівного підприємства · 6 місяців експлуатації



82%

охоплення обладнання (28 із 34
одиниць)



347

давачів у системі моніторингу



18 500

повідомлень за хвилину (потік даних)



99,3%

доступність системи за 6 міс.
експлуатації

Мультипротокольна ретрофітна інтеграція без заміни обладнання:

OPC-UA

Сучасне ЧПУ-обладнання

FANUC FOCAS2

Верстати з ЧПУ FANUC

Modbus RTU

Старіше та різномірне обладнання

Підсистема машинного навчання

Гібридний підхід: часо-частотний аналіз сигналів + глибоке навчання



Isolation Forest

Виявлення аномальних станів обладнання

0,89

F1-score

$\theta = 0,65$

WARNING

$\theta = 0,80$

CRITICAL



LSTM (64 → 32)

Прогнозування залишкового ресурсу (RUL) підшипників

3,2 год

MAE

4,8 год

RMSE

0,91

R²

Стек ML: Isolation Forest · Random Forest · LSTM · FFT, спектральна щільність потужності · MLflow для управління моделями

Інтерфейс користувача та візуалізація

Веб-застосунок React · 3D-візуалізація Three.js · мобільний клієнт · Grafana-дашборди



Операційний моніторинг

3D-сцена цеху з кольоровою індикацією стану обладнання та поточними технологічними параметрами в реальному часі.



Аналітика та звіти

Дашборди OEE, аналіз простоїв, прогнози RUL обладнання, історичні тренди показників якості.



Аларми та сповіщення

Двопорогові аларми (WARNING/CRITICAL), маршрутизація сповіщень технікам та керівникам у режимі реального часу.



Технічне обслуговування

Календар планових ТО, журнал заявок, рекомендації на основі прогнозів RUL та оцінок ризику відмови.



Технологічні режими

Рекомендації з оптимізації режимів різання, валідація програм ЧПУ за критеріями якості та продуктивності.



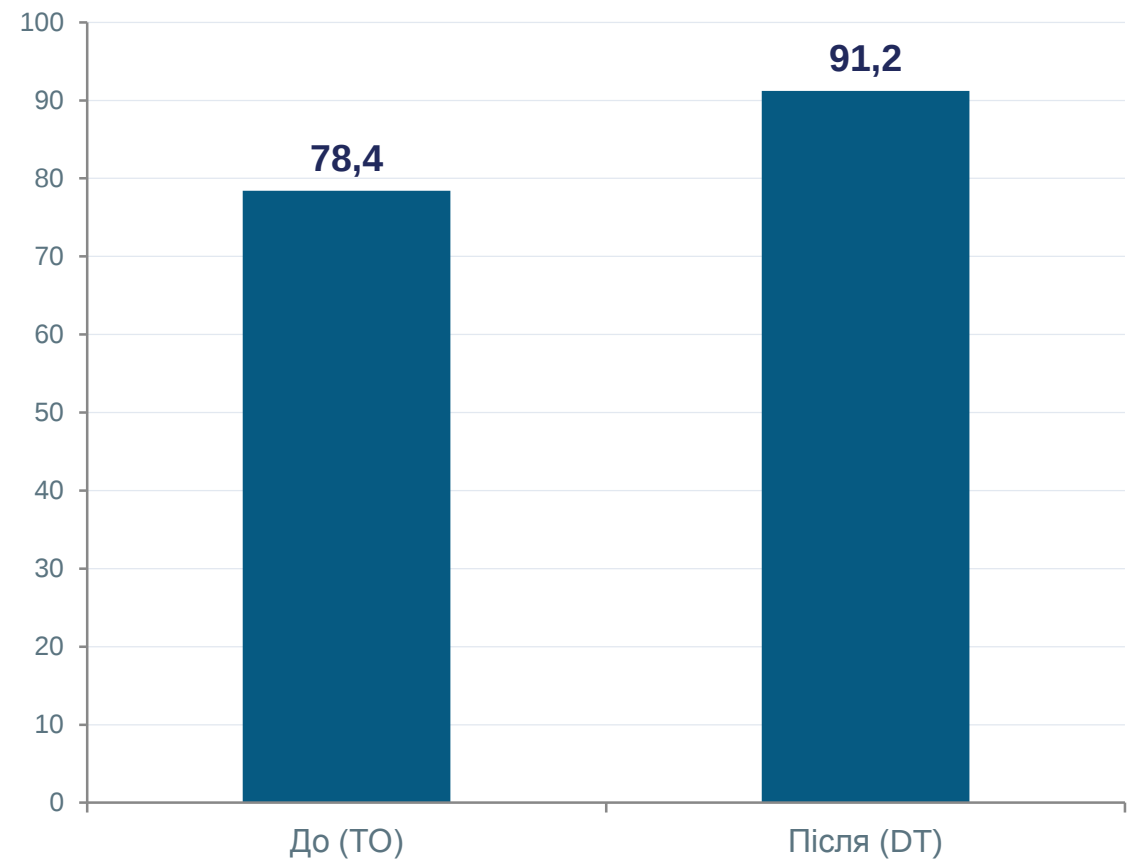
REST API + мобільний клієнт

Інтеграція з ERP/MES/CMMS, мобільний застосунок для операторів і техніків з push-сповіщеннями.

Ефективність впровадження: КРІ

Порівняння «до» (планово-попереджувальне ТО) vs «після» (Digital Twin) — 6 місяців

OEE — Overall Equipment Effectiveness

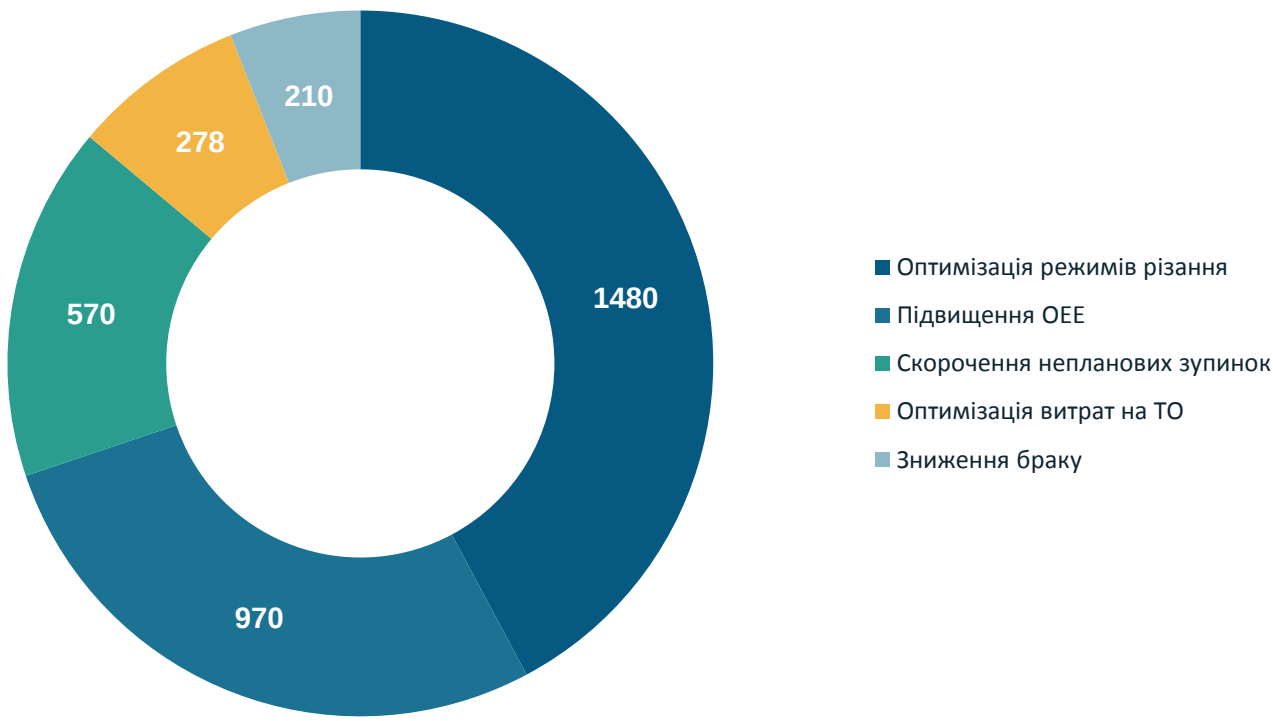


↓	Аварійні зупинки 8–12 → 2–3 / міс.	–74%
↓	Час простою на відмову 6,4 → 1,8 год	–72%
↓	Час реакції на аномалію 45–120 хв → <2 хв	–97%
↓	Витрати на ТО 138% → 94% від плану	–32%
↑	Доступність OEE 78,4% → 91,2%	+12,8 п.п.

Економічний ефект та окупність

Розрахунковий сукупний річний ефект та строк окупності інвестицій

Структура річного економічного ефекту, тис. грн



СУКУПНИЙ РІЧНИЙ ЕФЕКТ

≈ 3,5

млн грн / рік

СТРОК ОКУПНОСТІ

~1,1 року

CAPEX: 3,33 млн грн

OPEX: ≈ 520 тис. грн / рік

Наукова новизна

Інтегроване рішення для гетерогенного машинобудівного підприємства

1



Мікросервісна архітектура на Kubernetes

Незалежне горизонтальне масштабування 5 рівнів платформи та доступність 99,3% — на противагу монолітним рішенням промислових платформ.

2



Ретрофітна мультипротокольна інтеграція

Підтримка OPC-UA, FANUC FOCAS2 та Modbus RTU в єдиному крайовому агенті, що дозволило підключити 82% обладнання без заміни або модернізації.

3



Гібридна ML-аналітика

Поєднання часо-частотного аналізу сигналів (FFT, спектральна щільність потужності) з LSTM та Isolation Forest для роботи в умовах реального виробничого шуму.

Висновки та перспективи



Основні результати

- Розроблено 5-рівневу мікросервісну архітектуру цифрового двійника та обґрунтовано open-source технологічний стек.
- Реалізовано прототип на реальному виробничому об'єкті: 28 із 34 одиниць обладнання, 347 давачів, 18 500 повідомлень/хв.
- Розроблено гібридну ML-аналітику: $F1 = 0,89$ для виявлення аномалій та $MAE = 3,2$ год для прогнозу RUL підшипників.
- За 6 міс. експлуатації: OEE зріс на +12,8 п.п., аварійні зупинки скоротились на 74%, час реакції — на 97%.
- Сукупний річний економічний ефект $\approx 3,5$ млн грн при строку окупності $\sim 1,1$ року.



Напрями подальших досліджень

- ▶ Розширення переліку підтримуваних протоколів для охоплення решти 6 одиниць обладнання.
- ▶ Федеративне навчання моделей для об'єднання досвіду кількох підприємств без передачі конфіденційних даних.
- ▶ Впровадження механізмів зворотного управління: передача коригувальних команд від ЦД безпосередньо до систем ЧПУ.
- ▶ Інтеграція з корпоративними системами ERP / MES / CMMS у режимі двостороннього обміну даними.

Дякую за увагу!

Майстер Іван Сергійович

Технічні та прикладні аспекти створення цифрових двійників промислових підприємств

Науковий керівник: к.т.н., доцент Савченко Т. В. · НаУКМА · 2026