

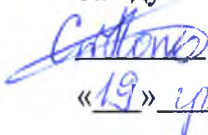
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет**

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

«На правах рукопису»
УДК 004.94

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ
«19» грудня 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

на тему: «Цифровий двійник виробничого процесу складання виробів»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ПБ-31мп

Філіппов Олексій В'ячеславович

Науковий керівник:

Старший викладач кафедри комп'ютерно-

Інтегрованих технологій виробництва приладів, к.т.н.,

Демченко Марія Олександрівна

Консультант з назва розділу:

завідувач кафедри економічної кібернетики

д.е.н., професор,

Бояринова Катерина Олександрівна

Рецензент:

Доцент кафедри автоматизації та систем

Неруйнівного контролю, к.т.н., доцент

Петрик Валентин Федорович

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) 

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174- Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ

«16» вересня 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Філіппову Олексію В'ячеславовичу

1. Тема дисертації **«Цифровий двійник виробничого процесу складання виробів»**, науковий керівник дисертації Демченко Марія Олександрівна, к.т.н., затверджені наказом по університету від «07» листопада 2024 р. № 4987-с
2. Термін подання студентом завершеної дисертації 20 грудня 2024 року
3. Об'єкт дослідження виробничий процес складання
4. Вихідні дані технологічний процес складання
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Анотація. Вступ 1. Аналіз проблеми розроблення та використання цифрових двійників в промисловості. 2. Аналіз концепції та методів створення цифрових двійників виробництва. 2. Розробка архітектури та компонентів цифрового двійника виробничого процесу складання виробів. 4. Розробка стартап-проекту. Висновки

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу презентація за матеріалами дослідження

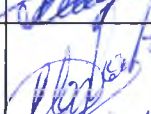
7. Орієнтовний перелік обов'язкових публікацій тези доповідей на науково-технічних, наукових конференціях, стаття у фаховому виданні категорії Б.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проекти	завідувач кафедри економічної кібернетики, д.е.н., проф. Бояринова К.О.		

9. Дата видачі завдання 16 вересня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз проблеми розроблення та використання цифрових двійників в промисловості	20.09.2024	
2.	Аналіз концепції та методів створення цифрових двійників виробництва	20.10.2024	
3.	Розробка архітектури та компонентів цифрового двійника виробничого процесу складання виробів	20.11.2024	
4.	Розробка стартап-проекту	03.12.2024	
5.	Оформлення пояснювальної записки та презентації за результатами дослідження	18.12.2024	
6.	Подання магістерської дисертації до захисту	20.12.2024.	

Студент

Науковий керівник



Олексій ФІЛІПОВ

Марія ДЕМЧЕНКО

Реферат

Магістерська дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання та списку наукових праць. Основний текст складається із 90 сторінок, включає 25 рисунків, 23 таблиці та 45 джерел посилання.

У роботі обґрунтовано актуальність розроблення цифрових двійників для виробничих процесів у контексті Індустрії 4.0. Вступ містить визначення мети дослідження — розробка архітектури та компонентів цифрового двійника для складального виробництва, а також формулювання завдань і наукової новизни роботи.

Перший розділ присвячено аналізу проблеми розроблення та впровадження цифрових двійників у промисловості. Детально розглянуто поняття цифрового двійника, його основні функції та переваги для сучасного виробництва, а також ідентифіковано основні виклики, пов'язані з впровадженням цієї технології.

У другому розділі виконано аналіз існуючих концепцій та архітектур цифрових двійників. Представлено огляд міжнародних стандартів, таких як RAMI 4.0 та ISO 23247, і досліджено багаторівневі архітектури, які забезпечують інтеграцію фізичних та віртуальних виробничих систем.

Третій розділ зосереджено на розробці архітектури цифрового двійника складального виробництва. Визначено вимоги до системи, побудовано імітаційну модель складального процесу та запропоновано структуру взаємодії між фізичними і цифровими компонентами системи.

У четвертому розділі розглянуто створення стартап-проєкту на основі розробленого цифрового двійника. Проведено аналіз ринкових можливостей, розроблено бізнес-модель та маркетингову стратегію для впровадження технології у промисловість.

Наукова новизна полягає у розробці моделей цифрових двійників для об'єктів складання та виробничих процесів, що дозволяє відстежувати стан виробництва в реальному часі та оптимізувати ресурси. Практична цінність роботи полягає у можливості впровадження запропонованого цифрового двійника для підвищення ефективності складального виробництва.

Результати дослідження апробовані на наукових конференціях і опубліковані в спеціалізованих виданнях.

Abstract

The master's thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references, and a list of scientific works. The main text comprises 90 pages, includes 25 figures, 23 tables, and 45 references.

The study substantiates the relevance of developing digital twins for manufacturing processes within the context of Industry 4.0. The introduction outlines the research objective—developing the architecture and components of a digital twin for assembly production—and defines the tasks and scientific novelty of the work.

The first chapter focuses on analyzing the challenges of developing and implementing digital twins in industry. The concept of the digital twin, its main functions, and advantages for modern manufacturing are examined, along with the identification of key challenges related to its implementation.

The second chapter analyzes existing concepts and architectures of digital twins. An overview of international standards, such as RAMI 4.0 and ISO 23247, is provided, and multi-layered architectures that ensure the integration of physical and virtual manufacturing systems are explored.

The third chapter is devoted to developing the architecture of a digital twin for assembly production. System requirements are defined, a simulation model of the assembly process is created, and the structure of interaction between the physical and digital components of the system is proposed.

The fourth chapter discusses the creation of a startup project based on the developed digital twin. A market opportunities analysis is conducted, and a business model and marketing strategy for implementing the technology in the industry are developed.

The scientific novelty lies in the development of digital twin models for assembly objects and manufacturing processes, enabling real-time production monitoring and resource optimization. The practical significance of the work is the potential application of the proposed digital twin to enhance the efficiency of assembly production lines.

The research results have been presented at scientific conferences and published in specialized journals.

Зміст	
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В ПРОМИСЛОВOSTІ.....	9
1.1. Поняття цифровий двійник у промисловості.....	9
1.2. Проблеми створення та впровадження цифрового двійника у виробничий процес	11
1.3. Аналіз рішень та платформ у сфері цифрових двійників та їх використання в промисловості	13
Висновки до розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЇ ТА МЕТОДІВ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ВИРОБНИЦТВА	19
2.1. Стандарти та архітектурні підходи до створення цифрових двійників на промислових підприємствах.....	19
2.2 Ідентифікація елементів фізичних виробничих систем та взаємозв'язків при створенні цифрового двійника	33
2.3. Цифровий двійник у складанні виробів.....	38
2.3.1. Модель об'єкта складання на основі цифрового двійника	40
2.3.2. Модель процесу складання на основі цифрового двійника (ЦД-ПС)	41
2.3.4 Інформаційна модель об'єкта складання на основі ЦД	42
2.3.5 Інформаційна модель цифрового двійника процесу складання виробів	45
2.4. Інтелектуальна структура реалізації процесу складання.....	48
Висновки до розділу 3	51
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ТА КОМПОНЕНТІВ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ВИРОБНИЧОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ СКЛАДАЛЬНИХ ОДИНИЦЬ	53
3.1. Вимоги до цифрового двійника складального виробництва	53
3.2. Цифровий двійник складального виробництва.....	55

Висновок до розділу 3	64
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК СКЛАДАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА».....	67
4.1 Опис ідеї стартап-проєкту	67
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту	70
4.4 Розроблення ринкової стратегії стартап-проєкту	78
4.5 Розроблення маркетингової програми та бізнес моделі стартап-проєкту	81
Висновки до розділу 4	87
ВИСНОВОК.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	91

ВСТУП

Індустрія 4.0 стала новим етапом розвитку виробничих систем, де поєднуються інформаційні технології, штучний інтелект та автоматизація. В цьому контексті цифрові двійники виступають ключовим елементом для інтеграції фізичних і цифрових систем. Виробництво в сучасних умовах стикається з низкою викликів, серед яких:

- необхідність підвищення гнучкості виробничих процесів;
- зниження витрат та оптимізація використання ресурсів;
- забезпечення високої якості продукції в умовах мінливого попиту.

Цифрові двійники дозволяють створити точну цифрову копію фізичних процесів, що сприяє підвищенню ефективності планування, прогнозування і управління.

Незважаючи на потенційні переваги, впровадження цифрових двійників у виробничих системах залишається складним завданням. Основними проблемами є:

- відсутність єдиних стандартів і підходів до побудови цифрових двійників;
- висока вартість і складність інтеграції з існуючими виробничими системами;
- необхідність великих обсягів даних та їх обробки в реальному часі.

Цифрові двійники є інноваційним рішенням для промисловості, яке дозволяє забезпечити:

- дистанційний моніторинг і управління процесами;
- прогнозування відмов обладнання та передиктивне обслуговування;
- зниження простоїв і підвищення продуктивності виробничих ліній.

В умовах глобалізації та швидких змін ринку компанії змушені швидко адаптуватися, що робить цифрові двійники необхідним інструментом для збереження конкурентоспроможності.

Зважаючи на актуальні умови, такі як пандемія та військовий стан, цифрові двійники стали особливо цінними для промисловості. Вони забезпечують автономність персоналу, безперервність виробничих процесів і можливість контролювати виробництво навіть у віддаленому режимі.

Дослідження цифрових двійників не лише розширює наукове уявлення про інтеграцію фізичних і віртуальних систем, але й має значний практичний внесок у розвиток промисловості. Це дозволяє скорочувати цикл виробництва, знижувати витрати на обслуговування і підвищувати точність операцій.

Таким чином, **актуальність дослідження** обумовлена нагальною потребою в модернізації виробничих процесів із використанням цифрових технологій. Розробка цифрового двійника складального виробництва відкриває нові можливості для підвищення ефективності підприємств і забезпечення їхньої стійкості в умовах сучасних викликів.

Мета роботи – формування архітектури та розроблення компонентів цифрового двійника виробничого процесу складання

Для досягнення мети магістерської дисертації були поставлені наступні **задачі**:

- Аналіз проблеми розроблення та використання цифрових двійників в промисловості;
- Аналіз платформ в сфері цифрових двійників та їх використання у промислових системах;
- Аналіз архітектурних підходів до створення цифрових двійників у виробництві;
- Розроблення вимог до цифрового двійника складального виробництва та його компонентів;
- Формування архітектури цифрового двійника складального виробництва;

- Розроблення цифрової моделі виробничого процесу складання та контролю

Об'єкт дослідження – виробничий процес складання.

Предмет дослідження – цифровий двійник виробничого процесу складання.

Методи дослідження базуються на алгоритмі функціонування цифрових двійників, імітаційному моделюванні виробничого процесу складання

Наукова новизна. За результатами виконання магістерської дисертації отримані наступні наукові результати:

Запропоновані моделі цифрових двійників об'єкту складання та виробничого процесу складання.

Розроблено **структуру реалізації процесу складання на основі моделей цифрових двійників** об'єкту складання та виробничого процесу складання.

Визначені вимоги до цифрового двійника складального виробництва

Практична цінність – на основі моделі цифрових двійників об'єкту складання та виробничого процесу складання розроблено цифровий двійник виробничого складання виробу, який дозволяє в режимі реального часу відслідковувати стан виробництва.

Апробація результатів дослідження:

Основні наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі, були представлені та обговорювались на таких наукових міжнародних та всеукраїнських конференціях: «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» (м. Київ, 2023, 2024), «Погляд у майбутнє приладобудування» (м. Київ, 2024), «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку» (м. Черкаси, 2024).

Публікації:

О. В. Філіппов Використання цифрового двійника для складального виробництва / М.В. Філіппова, М.О. Демченко, О.В. Філіппов, С.С. Заєць // Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки. – 2024. №3(1). – С. 202-208. DOI: <https://doi.org/10.31891//2307-5732-2024-335-3-28>

О. В. Філіппов Концепція цифрового двійника складального виробництва / М.В. Філіппова, М. О. Демченко, О. В. Філіппов // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція, 11-17 березня 2024 р. – Черкаси, 2024. – С. 178 – 180.

О.В. Філіппов Цифровий двійник виробничого процесу виробництва / М.В. Філіппова, О.В. Філіппов, М.О. Демченко // Приладобудування: стан і перспективи: XXIII Міжнародна науково-технічна конференція , 14-15 травня 2024 року. – Київ. С. 77-80.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В ПРОМИСЛОВOSTІ

1.1. Поняття цифровий двійник у промисловості

Цифровий двійник відіграє важливу роль у Індустрії 4.0, оскільки дозволяє поєднувати інформаційну технологію та операційну технологію для створення нової цінності шляхом зв'язку підготовчого етапу виробництва та його контролю за реальним виробництвом.

Технологія цифрових двійників (ЦД) бере свій початок у 2003 році, коли М. Грівс запропонував концепцію для управління життєвим циклом промислових продуктів (PLM) [1]. Грівс описав концепцію цифрових двійників із трьох аспектів: фізичний об'єкт, віртуальний об'єкт та зв'язок між ними (рис. 1.1). Концепція одразу викликала значний інтерес як у наукових колах, так і в промисловості завдяки великому потенціалу застосувань. На сьогодні цифрові двійники успішно впроваджені для різних цілей у багатьох сферах, таких як аерокосмічна інженерія, робототехніка, розумне виробництво, відновлювальна енергетика та процесна індустрія.

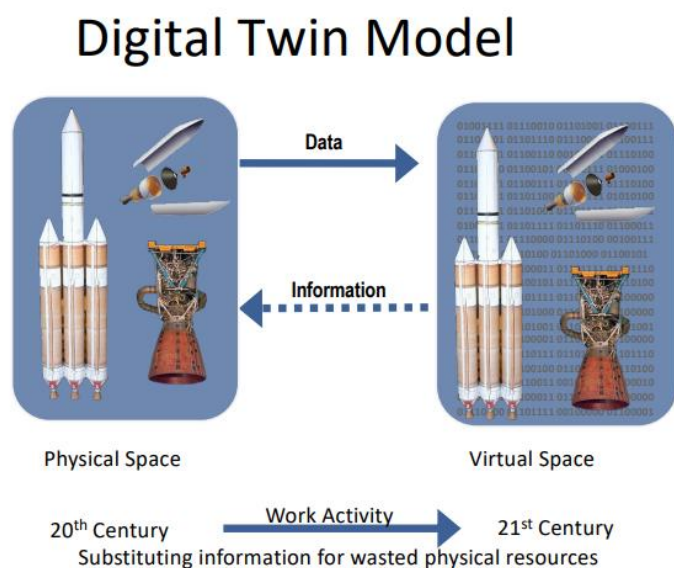


Рисунок 1.1. – Концепція цифрового двійника за М. Грівсом [1]

Побічним ефектом такого широкого використання стало те, що концепцію цифрового двійника почали інтерпретувати по-різному. Одне з найбільш визнаних визначень було запропоноване Глесгеном та ін. у 2012 році. Вони описали цифровий двійник як інтегровану багатофізичну, багатомасштабну й імовірнісну симуляцію складного продукту, яка використовує найкращі доступні фізичні моделі, оновлення з датчиків тощо для відображення життєвого циклу відповідного об'єкта. Ще одна сучасніша інтерпретація цифрового двійника визначає його як цифрове представлення фізичного об'єкта або зібраного компонента, яке використовує інтегровані симуляції й сервісні дані, зберігаючи інформацію з кількох джерел протягом усього життєвого циклу продукту.

Цифровий двійник (Digital Twin) — програмний аналог фізичного пристрою, що моделює внутрішні процеси, технічні характеристики та поведінку реального об'єкта в умовах впливу перешкод та навколишнього середовища. Важливою особливістю цифрового двійника є те, що завдання на нього вхідних впливів використовується інформація з датчиків реального пристрою, що працює паралельно. Робота можлива як в онлайн, так і в офлайн-режимі. Далі можливе проведення порівняння інформації віртуальних датчиків цифрового двійника з датчиками реального пристрою, виявлення аномалій та причин їх виникнення [2].

Серед основних переваг ЦД для промисловості [3] зазначимо, що вони:

- дозволяють реалізувати дистанційний моніторинг та управління фізичним об'єктом у реальному часі там, де це неможливо іншими засобами;
- забезпечують більшу автономію персоналу у разі потреби, таким чином підвищуючи ефективність та безпеку виробництва, що особливо цінно з урахуванням досвіду пандемії 2020 р. та військового стану;

- створюють умови для передиктивного обслуговування та планування ремонтів обладнання за рахунок обробки та інтелектуального аналізу в реальному часі великих обсягів даних про роботу промислових активів;
- дозволяють проводити аналіз виробничих сценаріїв та оцінку ризику шляхом програвання позаштатних ситуацій без шкоди для реального виробництва;
- підтримують та прискорюють прийняття рішень за рахунок розширеної аналітики даних у реальному часі;
- спрощують документування та комунікації, використовуючи доступну on-line інформацію, та, в поєднанні з автоматизованою звітністю підвищують прозорість бізнес-процесів.

1.2. Проблеми створення та впровадження цифрового двійника у виробничий процес

Цифровий двійник, який може бути використаний у виробництві буде представляти його цифрову копію, тобто прототип виробничої системи у віртуальному середовищі, який можна використовувати для контролю процесів, а також моделювання та симуляції. на виробничих підприємствах є цифровою копією, тобто віртуальним представленням, фізичної реальності [13]. Моделювання та симуляція виробничої системи в ЦД проводиться з урахуванням стану фізичної системи, наприклад моделювання окремих операцій виробництва або роботи окремого робочого місця. Віртуальне представлення базується на обміні даними між фізичною та віртуальною системами. Дані збираються у фізичному просторі та інтерпретуються за допомогою моделювання та симуляції у реальному часі з оновленням віртуальної системи [14]. Обмін даними між фізичною реальністю та віртуальним представленням ЦД передбачається

здійснювати в режимі реального часу завдяки новим технологіям, які характеризують парадигму Industry 4.0 [15].

Цифрові двійники можна застосувати на всіх етапах життєвого циклу виробу, але для виробничої системи доцільно застосовувати для етапу проектування, конфігурації або реконфігурації та етапі експлуатації. Так, на етапі проектування виробничої системи ЦД можна використовувати для створення моделі виробництва, яка буде включати розміщення обладнання, шляхи переміщення деталей тощо. Зокрема, ЦД може протестувати концептуальну схему системи, визначити основні параметри та використовуватись на етапі її запуску [16]. Використання ЦД на етапі конфігурації або реконфігурації виробництва, забезпечує швидку перевірку створеної або оновленої системи, на основі інформаційних та контрольних циклів обміну даними між фізичним та віртуальним середовищем. Крім того, DT можна використовувати для підтримки етапу конфігурації або реконфігурації виробничих систем завдяки його функціональності, яка базується на інформаційних і контрольних циклах між фізичним і віртуальним середовищем, що забезпечує динамічну перевірку та швидку реконфігурацію виробничої системи [16, 17]. В даному випадку ЦД можна розробити для оптимізації процесі виробництва та роботи обладнання для створення або вдосконалення виробничої системи, з метою підвищення її ефективності.

Цифровий двійник, які створюється на етапі роботи виробничої системи, можна використовувати для її оптимізації на основні даних отриманих від фізичного середовища в режимі реального часу. Тобто, функціональні можливості створеного ЦД будуть представлені як операційний інструмент для моделювання параметрів або їх контролю у віртуальному середовищі.

Тобто, створення ЦД для промислових підприємств, дозволить моделювати виробничі процеси та аналізувати їх продуктивність й

ефективність, створення автоматизованої цифрової виробничої лінії, дозволить проводити моніторинг стану обладнання та здійснювати оперативне реагування на зміни його стану [16, 17, 20].

Незважаючи на те, що ЦД надає переваги для промислових підприємств, його впровадження може бути дуже складним для них, і при розробці цих систем у конкретних промислових умовах виникають деякі проблеми [22]. Компанії все ще намагаються досягти успішного впровадження ЦД, оскільки вони стикаються з кількома труднощами, які ускладнюють розгортання цієї технології [23]. Таким чином, лише кілька великих фірм мають потенціал і фінансову спроможність для створення ЦД [24]. Ці труднощі заважають більшості компаній-виробників отримати економічні та фінансові переваги, пов'язані з ЦД. Більшість досліджень, які стосуються теми впровадження DT, в першу чергу стосуються лабораторних експериментів, таких як [24-26], таким чином, необхідні подальші емпіричні дослідження для підтримки промислових підприємств у впровадженні ЦД.

1.3. Аналіз рішень та платформ у сфері цифрових двійників та їх використання в промисловості

Для того щоб компанії могли отримати максимум користі від цифровізації, концерн Siemens розробив систему Digital Enterprise - комплекс цифрових рішень в області програмного забезпечення і автоматизації. Він дозволяє підприємствам галузі дискретного і безперервного виробництва збільшувати швидкість, гнучкість і ефективність роботи [27].

Програмний комплекс Digital Enterprise Suite надає виробничим компаніям можливість інтегрувати і цифровізувати свої бізнес-процеси (в тому числі їх постачальників). Вони можуть приступити до цього в будь-якій ланці виробничо-збутового ланцюжка: на етапах конструювання

виробів, планування /проектування/ виробництва, а також надання послуг, поступово розширюючи сферу застосування цифровізації.

Те саме можна сказати і про машинобудування - від конструкторської розробки машини до проектування, введення в експлуатацію, експлуатації та обслуговування машини. MindSphere - відкрита хмарна операційна система для IoT - служить містком до інтернету речей. Це означає, що виробники можуть аналізувати свої потужності і продукти в реальних умовах використання і застосовувати отримані висновки протягом усього виробничо-збутового ланцюжка для його безперервної оптимізації. Машинобудівники можуть аналізувати характеристики машини для її постійної оптимізації, що дозволить навіть впроваджувати нові моделі обладнання.

CADMATIC eShare™ - цифрове програмне забезпечення створення цифрового двійника для переробної промисловості та суднобудування [28]. Це інтегроване міжплатформне рішення для візуалізації всіх даних проектування, закупівель і будівництва, надає доступ до всіх даних проекту, включаючи PDM/PLM, закупівлі, аналізу і відстеження будівництва або ERP.

ANSYS TWIN BUILDER, Ansys, Inc [29] оптимізує процес створення цифрового двійника – підключеної копії поточного активу. Цей ефективний інструмент дозволяє розширене управління життєвим циклом і точне прогнозоване технічне обслуговування, звільняючи від непотрібних витрат і допомагаючи зберегти конкурентну перевагу. Компанія Ansys, Inc. пропонує оригінальну концепцію Цифрового двійника на основі всебічного використання технологій чисельного моделювання. ANSYS TWIN BUILDER використовується для створення цифрового двійника виробу, тобто програмний аналог його фізичного стану, який дозволяє моделювати внутрішні процеси, технічні характеристики, поведінку фізичного об'єкта в

реальних умовах з врахуванням впливу факторів навколишнього середовища, таких як температура, навантаження тощо.

ExtendSim, ANDRITZ Inc. [30] — це програма моделювання для моделювання дискретних подій, безперервних, агентних, дискретних і змішаних процесів. Існує три основних пакети побудови імітаційної моделі ExtendSim: CP для моделювання безперервних процесів; DE, який додає технологію дискретних подій; і Pro, який додає модулі блок-схем дискретної швидкості та надійності. ExtendSim Analysis RunTime призначений для аналізу моделей, а ExtendSim Cloud надає доступ до моделей, розташованих на власних серверах, для аналізу внутрішніми або зовнішніми користувачами.

FlexSim — це пакет програмного забезпечення моделювання дискретних подій, розроблений компанією FlexSim Software Products, Inc. Сімейство продуктів FlexSim наразі включає середовище моделювання продуктів FlexSim загального призначення та систем охорони здоров'я (**FlexSim HC**) [30].

Модель промислового виробництва в системі Flexsim представляється у тривимірній віртуальній реальності, за допомогою вбудованої бібліотеки елементів, таких як конвеєри, верстати, склади, оператори тощо.. Система Flexsim надає можливості для створення моделей та підмоделей безпосередньо на мовою C++, якою в системі Flexsim проводиться перехід від структурної до імітаційної моделі. Програмне забезпечення системи Flexsim дозволяє імпортувати та експортувати дані у всі найпопулярніші таблиці та бази даних пакетів прикладних програм для подальшої статистичної обробки та оптимізації, також система дозволяє створювати діаграми, які візуалізують параметри процесу виробництва для його контролю.

Середовище FlexSim зручне у використанні для моделювання та аналізу процесу виробництва, оскільки побудова моделей відбувається 3D

просторі, з одночасним створенням логіки процесу складної моделі, якою є процес виробництва. що візуально зручніше і значно полегшує процес верифікації [10]. Інтерфейс програми та інструмент ProcessFlow дозволяють задати логіку складної моделі.

Середовище FlexSim має інструмент створення інтерфейсу користувача, що дає змогу створити окремий модуль зміни параметрів та вхідних даних моделі.

Програмний модуль ExpertFit, вбудований у FlexSim, призначений для визначення закону розподілу на основі вхідних даних у вигляді вибірки чисел.

Тому для моделювання системи виробництва було обране середовище FlexSim.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було проведено комплексний аналіз проблеми розроблення та використання цифрових двійників у промисловості. Основна увага приділялася визначенню концепції цифрового двійника, його ролі в сучасному виробництві та аналізу основних викликів і перспектив впровадження.

Цифровий двійник визначено як програмну модель фізичного об'єкта або процесу, яка дозволяє в режимі реального часу імітувати поведінку, технічні характеристики та внутрішні процеси об'єкта. Ця технологія, що є одним з ключових елементів Індустрії 4.0, забезпечує інтеграцію інформаційних та операційних технологій, створюючи нову цінність для виробничих систем.

Розглянуто переваги, які надають цифрові двійники для підприємств, серед яких:

- можливість здійснення дистанційного моніторингу та управління в реальному часі;
- підвищення ефективності та безпеки виробничих процесів;
- впровадження передиктивного обслуговування та скорочення простоїв обладнання;
- оптимізація процесів шляхом моделювання позаштатних ситуацій без ризику для реального виробництва.

Попри значний потенціал, впровадження цифрових двійників залишається складним через низку проблем:

- відсутність єдиних стандартів і підходів до створення цифрових двійників;
- високі витрати на впровадження та модернізацію виробничих систем;

- складність інтеграції з наявною інфраструктурою та недостатня кількість кваліфікованих кадрів для розробки і підтримки таких систем.

У розділі наведено огляд сучасних платформ для створення цифрових двійників, зокрема таких як Siemens Digital Enterprise, ANSYS Twin Builder, FlexSim та інші. Ці платформи пропонують широкий спектр інструментів для моделювання, симуляції та оптимізації виробничих процесів. Особливо відзначено їх роль у створенні гнучких і адаптивних виробничих систем.

Проаналізовані матеріали свідчать про те, що цифрові двійники мають стратегічне значення для сучасної промисловості, оскільки забезпечують підвищення конкурентоспроможності підприємств і сприяють їх стійкості в умовах сучасних викликів. Однак для їх успішного впровадження необхідні подальші наукові дослідження та розробка практичних рішень для подолання наявних бар'єрів.

Розгляд проблем і перспектив впровадження цифрових двійників у промисловість підтвердив актуальність дослідження в межах даної роботи. Подальші етапи дослідження зосереджуватимуться на розробці архітектури та компонентів цифрового двійника виробничого процесу, що забезпечить можливість інтеграції та ефективного застосування цієї технології в реальних виробничих умовах.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЙ ТА МЕТОДІВ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ВИРОБНИЦТВА.

Концепція створення цифрового двійника часто описується в дослідженнях, але майже не реалізується на практиці. Ще рідше впроваджується фізична виробнича система з її цифровим еквівалентом у контексті гібридного складання. Практичне вивчення віртуального введення в експлуатацію складних і взаємопов'язаних виробничих систем є складним для дослідження, оскільки відповідні об'єкти дослідження майже доступні.

Цей невикористаний потенціал існує, навіть незважаючи на те, що ЦД стає все більш важливим у промислових дискусіях щодо зниження витрат і підвищення економічної ефективності в різних галузях. Тим не менш, цифровий близнюк все ще стикається з кількома проблемами, і такі питання, як стандартизація даних, управління даними та безпека даних, потребують подальшого вивчення та вдосконалення, щоб реалізувати його ринковий потенціал [1].

2.1. Стандарти та архітектурні підходи до створення цифрових двійників на промислових підприємствах

Більшість промислових підприємств, прагне освоєння технологій з концепції Індустрії 4.0, а також перетворення і організації процесів всередині, як це описано в концепції розумного виробництва. Одна з фундаментальних еталонних моделей концепції "Індустрія 4.0" - це модель еталонної архітектури RAMI 4.0 (рис. 2.1). Ця модель була покликана вирішити проблему різноманітності та неузгодженості інформаційних моделей на підприємствах після появи концепції Індустрії 4.0 [8]. Дана модель еталонної архітектури містить 3 вісі: життєвого циклу виробу (горизонтальна ліва вісь), функціональної ієрархії (горизонтальна права вісь) і вісь шарів ІТ-архітектури (вертикальна вісь). На осі життєвого циклу

відображається актив у певний час протягом життєвого циклу. На осі функціональної ієрархії розглядаються функціональні моделі для певних рівнів. На осі шарів IT-архітектури виділяються шари у відповідність до багатшарової структури систем, що відображає специфічні функції активів. Виділяються 6 рівнів для цієї осі: бізнес, функціональний, інформаційний, комунікаційний, інтеграційний, технологічний.

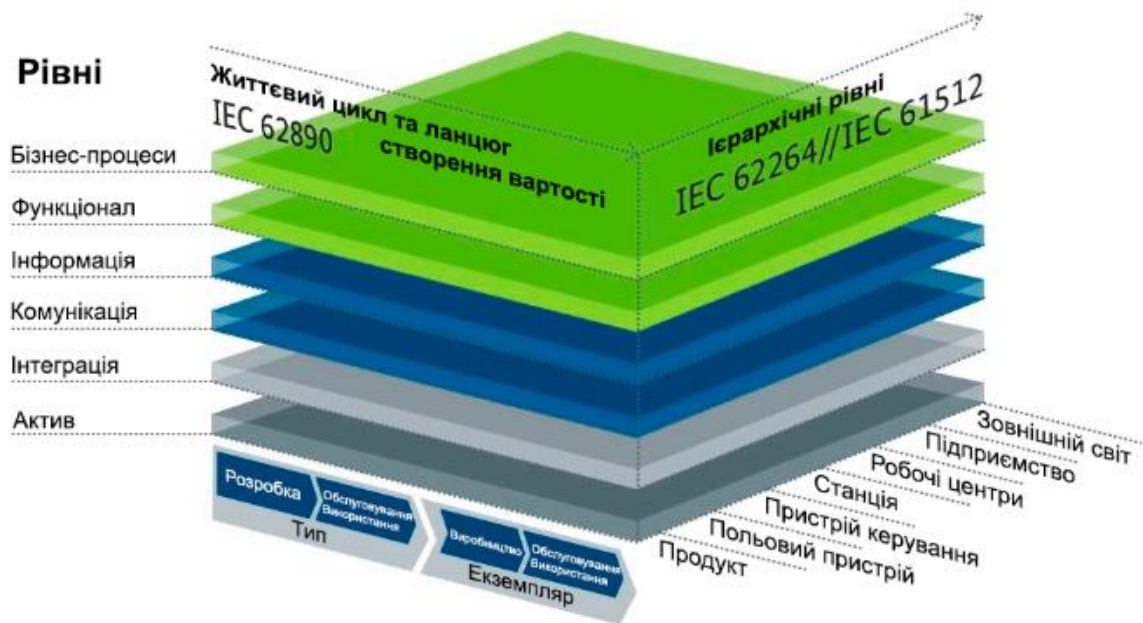


Рисунок 2.1. – Еталонна архітектурна модель Industry 4.0 (RAMI 4.0) [8]

В світі запроваджено наступні стандарти зі створення та використання цифрових двійників:

- IEC TS (The International Electrotechnical Commission Technical Specifications) 62832, Digital Factory Framework;
- IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) P2806, System Architecture of Digital Representation for Physical Objects in Factory Environments;
- IPC (The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits) 2551, International Standard for Digital Twins;

- ISO 23247, Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing.

Стандарт IEC TS 62832 «Цифрова фабрика» є більш узагальненим і основним стандартом, що забезпечує загальну базу для оцифрування даних, що належать до виробничих систем. Документ встановлює загальні правила використання даних, засновані на зрозумілих для обчислювальних машин критеріях та класифікації.

Стандарт від Інституту інженерів електротехніки та електроніки P2806 визначає системну архітектуру цифрового представлення фізичних об'єктів у заводських середовищах. Архітектура системи визначає мету, важливі компоненти, необхідні ресурси даних та базову процедуру встановлення цифрового представлення у заводських середовищах.

Стандарт від міжнародної асоціації виробників електроніки IPC 2551 являє собою новий стандарт у галузі цифрових двійників виробів та виробництв. У ньому даються визначення ЦД, виявляються особливості та проблеми під час впровадження, визначає архітектурні підходи під час створення ЦД, і навіть формується стандартний життєвий цикл ЦД. Цей стандарт опублікований у 2020, тому не набув ще широкої популярності.

Міжнародна організація стандартизації ISO також випустила стандарт ISO 23247 «Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing». Він визначає термінологію, містить загальні принципи та вимоги до розробки цифрових двійників на виробництві.

Стандарт ISO 23247 також надає еталонну архітектуру для цифрових двійників на виробництві. Основною особливістю архітектурного підходу, описаного в даному стандарті, є застосування Domain-Driven Design підходу, що базується на предметно-орієнтованому проектуванні. Основний принцип DDD — поділ програми на домени. Так у цьому стандарті виділяються такі домени:

- виробнича область, що спостерігається. Цей домен знаходиться поза платформи ЦД. Він забезпечує контекст для розробки цифрового двійника та взаємодіє з областю збору даних та управління пристроями;
- область збору даних та керування пристроями. Даний домен пов'язує виробничі елементи з їх цифровими двійниками для синхронізації, збирає дані з датчиків, встановлених об'єктах, і керує ними;
- основний домен. Відповідає за загальну експлуатацію та керування цифровим двійників. На ньому розміщуються програми та служби, такі як аналітика даних, моделювання та оптимізація, за допомогою яких здійснюється підготовка, моніторинг, моделювання та синхронізація;
- Домен користувача. Домен відповідає за взаємодію користувачів із цифровими двійниками. Користувачем може бути людина, пристрій, програма або система, що використовує програми та послуги, що надаються цифровими двійниками.

Кожен домен має логічну групу завдань та функцій, що виконуються функціональними сутностями (FES). На рисунку 2.2. показано функціональний вигляд об'єкта еталонної моделі.

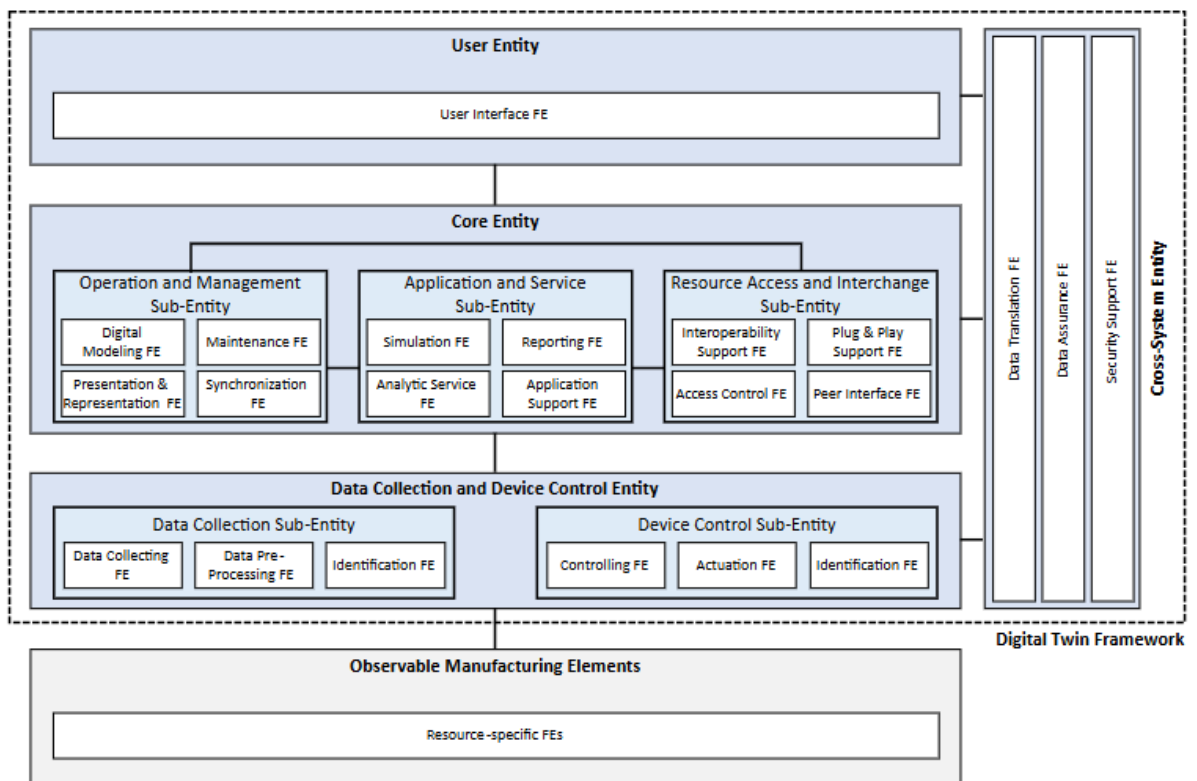


Рисунок 2.2. – Еталонна модель ІД на виробництві [ISO 23247]

Вона складається з п'яти основних частин:

1. Спостережуваний виробничий елемент (Observable Manufacturing Element).
2. Об'єкт збору даних та управління пристроєм (Data Collection and Device Control Entity, DCDCE). DCDCE являє собою дві частини, одна з яких збирає дані з об'єкта, що спостерігається і передає їх в Основну частину, інша частина контролює і приводить в дію спостережуваний елемент.
3. Основна частина (Core Entity, CE). Вона складається з трьох частин: експлуатація та управління, додаток та послуги, забезпечення ресурсами та обміном даними.
4. Користувальницька частина (User Entity, UE). Являє собою інтерфейси для взаємодії з основною частиною. UE може бути людиною оператором чи існуючим корпоративним додатком, таким як система управління

виробництвом (MES), система планування ресурсів підприємства (ERP) або інші цифрові двійники.

5. Міжсистемна частина (Cross-System Entity, CSE). CSE розміщується в різних доменах для забезпечення загальних функцій, таких як передача даних, перевірка достовірності даних та забезпечення безпеки [19].

У науковій літературі розглядаються концептуальні схеми для побудови цифрових двійників, що мають різні підходи до виділення основних елементів ЦД, а також кількість рівнів, що виділяються у відповідність до багаторівневої еталонної архітектури підприємств. У роботі з дослідження існуючих архітектурних підходів щодо створення ЦД виділяють 3х, 4х, 5ти, 6ти - шарові архітектури [18-20].

У трирівневій архітектурі, запропонованій компанією Siemens Corporate Technology для кіберфізичних систем були виділені основні елементи: фізичний світ, за яким здійснюється спостереження за допомогою обладнання, такого як датчики, що передають інформацію в кіберсвіт, з кіберсвіту здійснюється вплив на фізичний світ через обладнання, що виконує [18]. У тришаровій архітектурі для кіберфізичних систем пропонується виділити бізнес-шар, шар інтерфейсу/інтеграції та фізичний шар. Схематичне уявлення трирівневої архітектури показано рисунку 2.3.

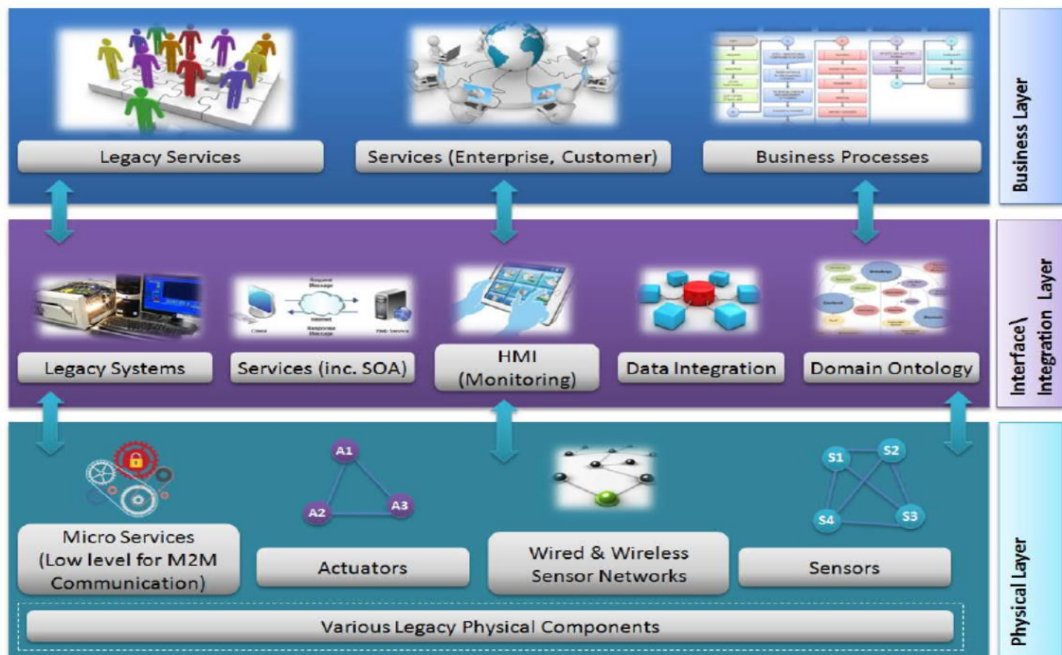


Рисунок 2.3. – Трирівнева архітектура ЦД

Бізнес-рівень включає аспекти, необхідні для розробки традиційних корпоративних систем:

- основні бізнес-процеси;
- застарілі послуги;
- корпоративні сервіси та сервіси для клієнтів;
- бізнес-програми, специфічні для конкретної області (наприклад, ERP).

Рівень інтеграції/інтерфейсу виконує функцію та інтеграцію даних з верхнього та нижнього рівнів системи. Він також може включати в себе інтерфейси користувача. А також забезпечує основу обчислювальних блоків. Обчислювальні модулі включають такі можливості, як:

- обробка семантичних інтерфейсів для доступу як до віртуальних, так і фізичних ресурсів;
- робота з машинно-інтерпретованими абстракціями предметної галузі системи, вираженими, наприклад, у форматі онтології;
- керування підпискою компонентів системи на семантичні події, наприклад, підписка компонента системи С на події, що генеруються

датчиками температури області А, за допомогою спеціального правила генерації подій.

- сервісні компоненти (наприклад, SOA, SCA – Архітектура сервісних компонентів, SOBA – Сервіс-орієнтовані бізнес-додатки)
- застарілі системи: ці системи є реалізацією апаратних і програмних компонентів (таких як вбудовані операційні системи та пов'язані з ними компоненти вбудованого програмного забезпечення) застарілих сервісів верхнього рівня.

Фізичний рівень включає всі об'єкти, які збирають дані з фізичного середовища (використовуючи датчики), взаємодіють з фізичним середовищем (використовуючи виконавчі механізми) і передають дані на верхній рівень (використовуючи дротові, спеціальні і бездротові мережеві компоненти). Цей рівень може включати:

- здатність сприймати інформацію - використання датчиків для отримання інформації про конкретний об'єкт або явища навколишнього середовища;
- ідентичність - здатність ідентифікувати себе з іншими об'єктами та системою;
- комунікація – можливість підключатися до мережі та передавати необхідні дані;
- можливість дії: коли середовище змінюється за допомогою виконавчих механізмів відповідно до поточних потреб або чітко визначених правил;
- мікросервіси включають сервіси, які виступають як засіб зв'язку між машинами (M2M) та пристроями (загалом, як у IoT).

В описаній трирівневій архітектурі досить прості та зрозумілі основні елементи, універсальні для всіх кіберфізичних систем. Однак у ній не враховуються особливості роботи та створення цифрових двійників.

У чотирьохрівнева архітектура, представлена у роботі китайських вчених, присвячена підходу розробки цифрових двійників в інтелектуальному виробничому середовищі, виділяють такі рівні: фізичний рівень, рівень вилучення та консолідації даних, рівень кіберпростору та рівень взаємодії [19]. Фізичний рівень включає всі фізичні елементи в їх робочому середовищі. Рівень вилучення та консолідації даних служить інтерфейсом між фізичним рівнем та рівнем кіберпростору за допомогою оцифрування, передачі та прийому даних. Рівень кіберпростору становить суть цієї структури та є рівнем, на якому ЦД існує та здійснює контроль над усією інфраструктурою. Останній рівень – це рівень взаємодії з користувачем, який представляє користувачам реалізовану мету ЦД – повсюдний моніторинг та управління. Схематичне уявлення чотирирівневої архітектури показано рисунку 2.4.

Фізичний рівень являє собою фізичну систему, що спостерігається, а також її оточення та їх взаємодія. Фізичний рівень включає в себе різне обладнання, яке використовує різні протоколи зв'язку, а також різні інтерфейси зв'язку для передачі даних. Щоб ці системи можна було контролювати у цифровому вигляді, вони мають бути переведені у цифрову форму та доступні у цифровій мережі. Залежно від використовуваного протоколу зв'язку, дані, отримані від кожної системи, будуть закодовані відповідно до стандарту, передбаченого протоколами зв'язку, на основі моделі OSI. Це призводить до величезної кількості пакетів даних, які необхідно інтерпретувати окремо один від одного, що ускладнює подальшу обробку.

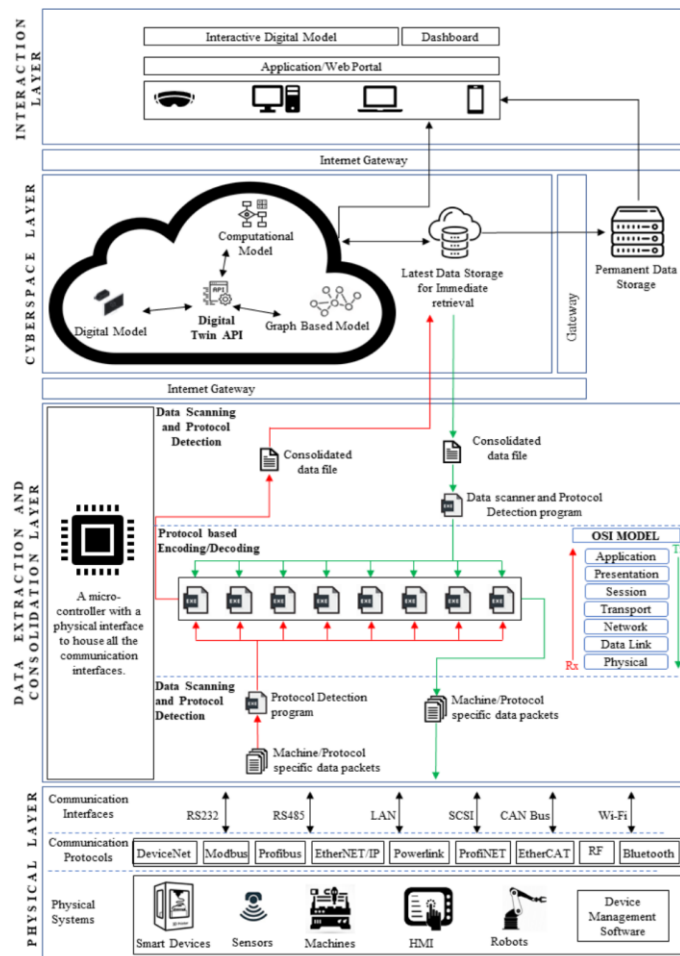


Рисунок 2.4 – Чотирьох рівнева архітектураЦД в інтелектуальному виробничому середовищі [19]

Рівень вилучення та консолідації даних служить сполучною ланкою між фізичним і кібернетичним рівнями, отримуючи всі пакети даних від фізичних систем, обробляючи їх і перетворюючи на машину форму, перш ніж передавати їх на кібернетичний рівень. Пакети даних, що отримуються з фізичного рівня, шифруються відповідно до протоколу зв'язку, що використовується фізичними системами. Оскільки вкрай неефективно обробляти дані від кожного об'єкта у фізичній системі незалежно, зібрані дані повинні бути зведені у стандартний формат машини. Модуль містить обробний пристрій, як мікроконтролер або комп'ютер, а також забезпечує необхідну інфраструктуру для підключення різних комунікаційних інтерфейсів фізичного рівня. Усі комунікаційні протоколи відповідають

моделі OSI передачі та прийому даних, у своїй кожен протокол використовує свій унікальний метод кодування і декодування. Отже, модуль вилучення даних спочатку запускає алгоритм сканування даних, що надходять, щоб ідентифікувати використовуваний протокол зв'язку. Потім ідентифіковані пакети даних відправляються у відповідне програмне забезпечення для вилучення даних, яке розшифровує сім рівнів моделі OSI для отримання даних, що передаються машиною. Дані з різних машин представлені у машинному уніфікованому форматі даних, такому як .txt або .csv-файл. Потім файли завантажуються в хмару, з якої можна отримати універсальний доступ до даних.

Рівень кіберпростору формує ядро архітектури ЦД і є рівнем, у якому встановлюється ЦД. Рівень кіберпростору містить пропоновану тримодельну ЦД, встановлену у хмарі, та хмарне сховище для обробки даних. Щоб забезпечити повсюдний доступ до фізичної системи, цифровий двійник встановлюється у хмарі, а Інтернет служить засобом зв'язку, що дозволяє отримати доступ до ЦД будь-якої точки світу. Цифровий двійник в даному випадку являє собою три моделі: цифрова модель, графічна модель, обчислювальна модель, пов'язані між собою за допомогою API ЦД, за допомогою якого здійснюється передача даних і прийом даних в хмарне сховище і з нього. Кіберпростір містить веб-сервер зберігання даних, на якому зберігаються необроблені дані, отримані на рівні вилучення та консолідації даних, а також відповідна оброблена інформація. Оскільки об'єм хмарного сховища обмежений і дорогий, у хмарі зберігаються лише найсвіжіші дані для негайного вилучення. Після чого вони переносяться до автономного сховища, де зберігаються постійно.

Рівень взаємодії - це останній рівень платформи DT, який дозволяє людині взаємодіяти з фізичною системою через цифровий двійник. Наявність DT у хмарному просторі надає можливість доступу до них з будь-якого місця на будь-якому пристрої, навіть з низькою

обчислювальною потужністю, оскільки майже вся робота виконується в хмарному просторі, і лише результат проектується або передається потоковою передачею на пристрій доступу через захищений канал. Отже, рівнем взаємодії може бути будь-який пристрій, який може відображати візуальну інформацію, розпізнаючи взаємодію користувача.

Автори [20] розглянули архітектурний підхід, у якому виділяються інші основні компоненти та шари, що представляє свій підхід п'ятивимірного цифрового двійника. Архітектура п'ятивимірного цифрового двійника (5D-DT) представлена на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5. – Архітектура п'ятивимірного цифрового двійника [20]

Ця модель ЦД 5D-DT складається з п'яти елементів:

- фізичний об'єкт;
- віртуальний об'єкт;
- модель даних;
- модель обслуговування;
- зв'язок.

Головна схожість у всіх розглянутих вище підходів - це наявність міжсистемної частини або зв'язків між рештою частин в архітектурі ЦД, в деяких архітектурних підходах цей зв'язок не виділяється в готельний архітектурний шар, проте обов'язково згадується, як зв'язуюча ланка між іншими шарами.

Ідеї концепції 5D-DT є основою архітектурного підходу GDTA (Generic Digital Twin Architecture), універсальна архітектура цифрового двійника, у якій розглядається шість рівнів [21]:

- рівень активів — Фізичне представлення DT розташоване на рівні активів і відповідає фізичному об'єкту моделі 5D-DT;
- рівень інтеграції — На рівні інтеграції можна розрізняти дані, які отримуються під час роботи фізичного об'єкта, а також технічні дані. Дані під час роботи виходять із датчиків та відображають поточний стан фізичного об'єкта. Зазвичай, ці дані дуже динамічні, тому базова інфраструктура повинна відповідати технічним можливостям, таким як обробка великих обсягів даних або реагування в режимі реального часу;
- на комунікаційному рівні використовуються протоколи промислового зв'язку або технологія промислового Інтернету (IoT). Використання конкретного протоколу залежить від вимог до застосування, наприклад, можливості роботи в режимі реального часу, також може бути використана комбінація різних протоколів;
- в рамках інформаційного рівня архітектури DT дані збираються та збагачуються семантикою та зв'язуються з іншою контекстною інформацією. Таким чином, обробка даних у підході 5D-DT (елемент модель даних) стає обробкою інформації на даному етапі. Центральний компонент всередині інформаційного шару - це загальна база знань, в якій зберігається контекстуальна інформація про ресурси та послуги;
- на функціональному рівні реалізовано елемент моделі обслуговування підходу 5D-DT. Сервіс-орієнтована архітектура

застосовується для забезпечення зв'язку та узгодженості певних функціональних можливостей. Сервіси DT можуть бути згруповані за їх функціональністю та можуть ґрунтуватися один на одному. Виділяються п'ять груп: обслуговування моделювання, обслуговування моніторингу, обслуговування діагностики, обслуговування прогнозування, обслуговування контролю та обслуговування реконфігурації. Сервіс моделювання є основним сервісом і співвідноситься з віртуальним об'єктом у підході 5D-DT. У цьому архітектурному підході детально розглядається рівень сервісів, виділяючи в окрему компоненту;

- на бізнес-рівні знаходиться бізнес-логіка, яка може керувати великим обсягом ЦД. У ньому визначаються загальні цілі та вибудовується бізнес-стратегія (наприклад, зниження ризику простою чи витрат), які мають бути досягнуті за допомогою ЦД.

GDТА представлена на рисунку 2.6.

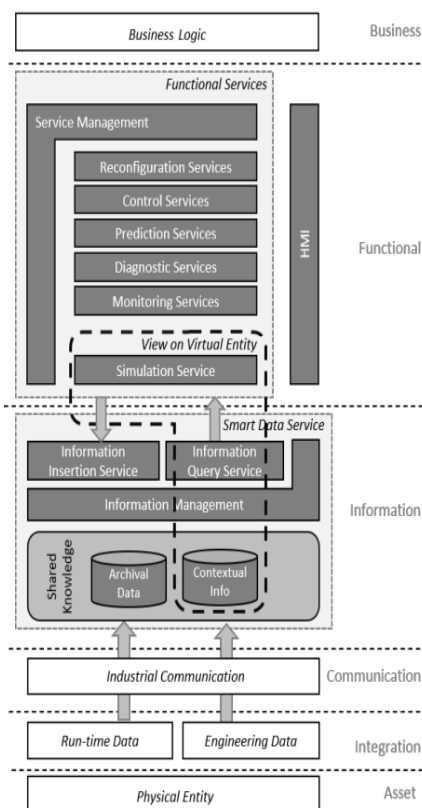


Рисунок 2.6 — Модель GDТА ЦД [21]

2.2 Ідентифікація елементів фізичних виробничих систем та взаємозв'язків при створенні цифрового двійника

Фізична виробнича системи має різні прояви та різноманітну структуру. Її можна розділити на штучне дрібносерійне виробництво, масове виробництво та масове налаштування відповідно до режиму виробництва, а також можна розділити на серійні, паралельні, складальні, демонтажні та гнучкі виробничі одиниці відповідно до взаємозв'язків організації виробництва.



Рисунок 2.7. – Основні елементи та взаємозв'язки, виявлені в фізичних виробничих системах [17]

Теорія моделювання дискретних подій є відносно зрілою і може бути використана для опису внутрішньої логіки сутностей та взаємодії між сутностями. Однак відсутність інкапсуляції деталей ускладнює прямий опис складних систем. Отже, ідентифіковані елементи та відношення можуть бути інкапсульовані у відповідні моделі подання відповідно до їх функцій та поведінки. Внутрішня логіка роботи таких моделей може бути описана за допомогою теорії моделювання дискретних подій. Взаємодію між моделями можна описати, визначив їх інтерфейси вводу/виводу. Для

реалізації уніфікованого вираження різномірних виробничих систем надається набір графічних та формальних моделей. На рисунку 2.8. показані ці моделі на трьох рівнях: складу, структури та функціонування. На рівні композиції сім елементів описують основні елементи (DMS). На рівні структури сервісні осередки (SC) та мережі логістичних шляхів (LPN) пропонуються для представлення виробничих та логістичних взаємозв'язків. Нарешті, логічна модель, заснована на мультівіртуальних сервісних вузлах (VSN), описана на операційному рівні, яка поєднує виробничі процеси, сервісні осередки та мережі логістичних шляхів в органічне ціле для досягнення впорядкованого потоку логічних частин [17].

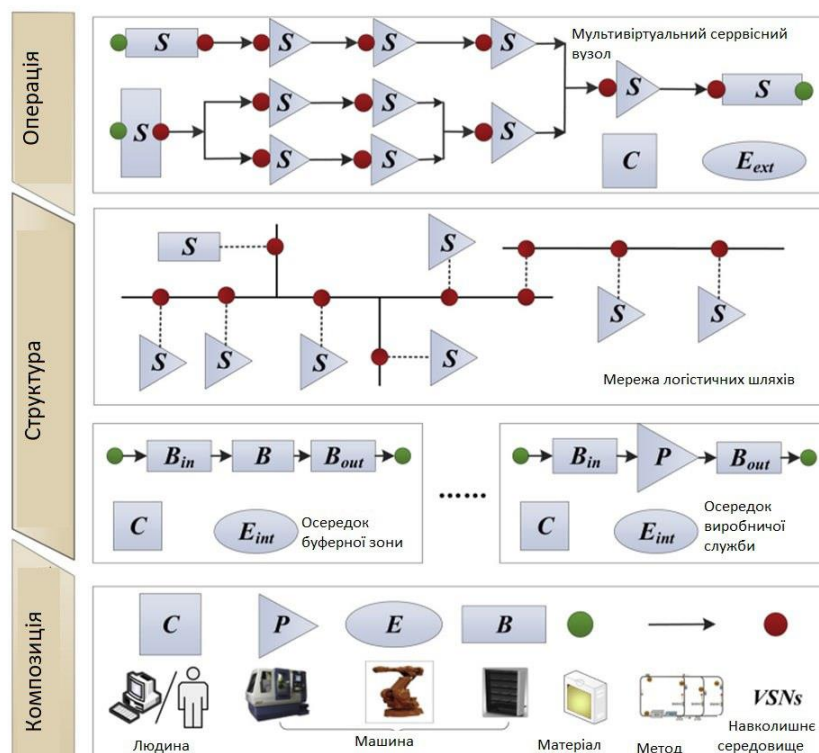


Рисунок 2.8. – Представлення виробничих систем

Для уніфікації елементів виробничих систем, пропонується модель (див. нижню частину рисунку 2.8). Кожен елемент є окремим об'єктом та виконує особливу роль системі, що містить у собі внутрішню логіку і взаємодіє із зовнішнім середовищем. Контролер (C) визначає функції та

логіку роботи. Процесор (P), Виконавець (E) та Буфер (B) утворюють базову фізичну структуру, яка представляє "машину" у фізичних системах. Поточний об'єкт (F) – зелена точка на рисунку представляє матеріал; Логістичний шлях (L) - лінія зі стрілкою на рисунку вказує напрямок потоку і являє собою правило потоку матеріалу; а VSN – червона точка на рисунку, пов'язує перелічені вище елементи для побудови віртуального операційного середовища. Ці основні елементи пов'язані з іншими другорядними елементами.

Формально модель визначається наступним чином [17]:

$$SevenElements = \langle C, P, E, B, F, L, VSN \rangle$$

- С – контролер, зіставлення різних пристроїв керування або осіб, які приймають рішення, надає служби ухвалення рішень для системних операцій. З одного боку, він перетворює вхідне повідомлення (IM) від контролера верхнього рівня, таке як операція, на наказ на виконання, а потім відправляє його іншим логічним моделям для виконання відповідно до визначеного правила обробки повідомлень (MR). З іншого боку, статус виконання та результат повертаються на контролер вищого рівня у вигляді вихідних повідомлень (OM).
- Р – процесор, зіставлення різних пристроїв обробки, забезпечує послуги з обробки (конкретна операція, наприклад фрезерування) деталей. Його стан (P_State) можна позначити поточним часом обслуговування (t), а відповідне відношення має вигляд

$$P_State = \begin{cases} 0(t = 0) \\ 1(0 < t < T) \\ 2(t = T) \end{cases}$$

де T – час обслуговування певної операції, три числа відносяться до очікувань завантаження, обробки та очікування вивантаження відповідно.

- Е – виконавець, зіставлення різних логістичних пристроїв, відповідає за переміщення деталей, кероване логістичними завданнями

відповідно до правил виконання. Логістичну задачу на вході можна визначити як

$IT = (F: O_i \rightarrow O_j)$, що означає, що поточна сутність (F) передається від об'єкта O_i до O_j . Правила виконання логістичних завдань (LR) включають програми управління рухом маніпулятора, алгоритми планування шляху автоматизованого керованого транспортного засобу (AGV) та механізми планування. Результати виконання логістичних завдань повертаються контролеру у вигляді вихідних повідомлень (OM), включаючи 4 типи завдань, а саме виконання, запущені завдання, успішно виконані завдання і невдало виконані завдання.

- F: Поточний об'єкт, зіставлення частин, включаючи матеріали або напівфабрикати, отримує послуги від P, E та B. Він ідентифікується глобальним унікальним номером (GUID), і його можна ідентифікувати та відстежувати. Крім того, він діє як носій інформації, включаючи інформацію про виробничий процес, виробничі плани, інформацію про історичні шляхи та інформацію про моделювання.
- L : Логістичний шлях, відображення логістичних відносин, представляє напрямок F між двома об'єктами (елементами або осередками).
- VSN : Віртуальний сервісний вузол, основна концепція, є високорівневою абстракцією та відображенням відношень організації виробництва, логіки логістики та логіки виробництва.

Далі відношення, можна сформулювати наступним чином:

$$SystemStructure = \langle SC, LPN \rangle$$

де SC – службовий осередок, підсистема, що складається із семи елементів із певною функцією. Він розділений на комірку виробничого обслуговування (PSC) та комірку буферного обслуговування (BSC); LPN –

мережа логістичних шляхів, відображення фактичної схеми логістики та взаємозв'язків.

Діяльність виробництва можна представити як ряд «послуг», які виконуються впорядкованим чином. Таким чином, всі дії, пов'язані з виробництвом, такі як обробка, складання, тестування та буферизація, можуть бути абстраговані до служби. Набір елементів з певним службовим змістом зв'язується в органічне ціле, яке називається службовим осередком. Подібно до семи елементів, SC також інкапсулює свою внутрішню логіку і взаємодіє із зовнішнім середовищем. На рівні SC Виконавець є внутрішнім Виконавцем (E_{int}), а логістичний шлях відноситься до спрямованого шляху між елементами. Буфер підрозділяється на вхідний буфер (B_{in}) і вихідний буфер (B_{out}) в залежності від зв'язку із зовнішньою частиною осередку. Відповідно, на системному рівні Виконавець є зовнішнім Виконавцем (E_{ext}), а логістичний шлях відноситься до напрямку між SC. Еталонні моделі та логічні моделі СК представлені на рисунку 2.9.

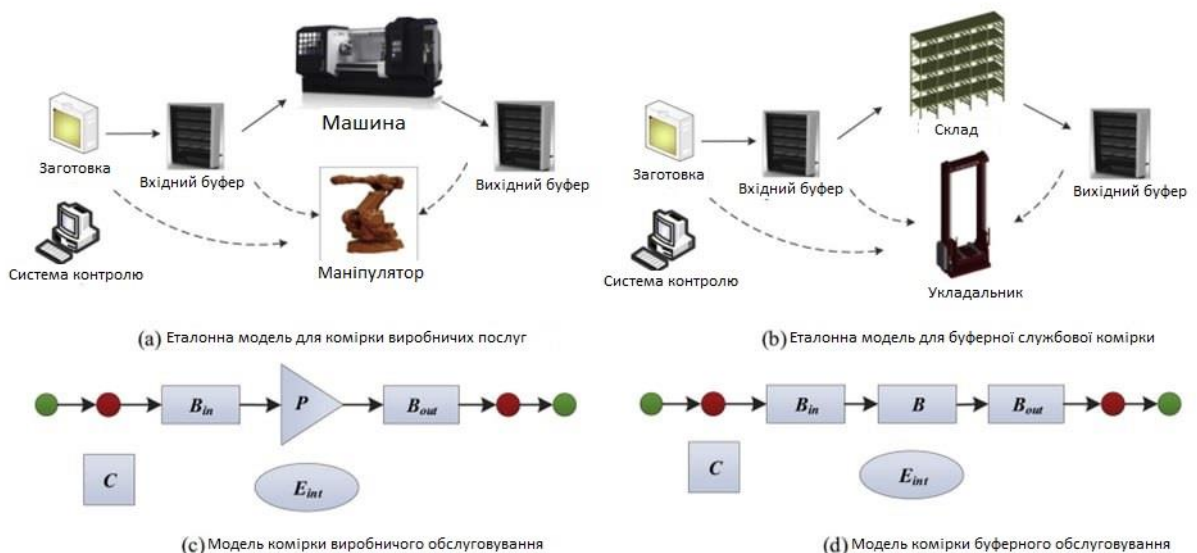


Рисунок 2.9. – Типові моделі сервісних осередків [17]

Як показано на рис 2.9. (a) та (c), в комірці виробничого обслуговування (PSC) процесор є основною частиною, яка забезпечує такі послуги з обробки, як механічна обробка, перевірка, декомпозиція або

збирання. F входить PSC через VSN , послідовно проходить через служби прийому B_{in} , P і B_{out} , нарешті, залишає PSC через VSN . C управляє E_{int} , щоб допомогти потоку F серед перерахованих вище елементів. Вищезгадана логіка визначена як шаблон логіки та інкапсульована C SC .

Як показано на рис. 2.9 (b) і (d), у буферному службовому осередку (PBC) буфер є основною частиною, яка забезпечує буферні послуги, такі як передачі або зберігання для F . Крім різниці у службовому змісті, існує немає істотних відмінностей між BSC і PSC за структурою та логіці.

Логічна модель виробничої системи описується взаємодіями між F , SC та LPN . Таким чином, ЦД можна змоделювати за допомогою взаємодії та інтеграції між ЦД продуктів, ЦД осередків та ЦД логістики. За схемою підключення 2, можуть бути побудовані верстати ЦД, роботи ДП та буфери ДП. Ці моделі DT можуть надалі будувати моделі DT вищого рівня, такі як ЦД комірки та ЦД логістики. Нарешті, ЦД продуктів, ЦД осередків та ЦД логістики взаємодіють, утворюючи ЦД виробництва, як показано на **рис. 2.10 (b)**.

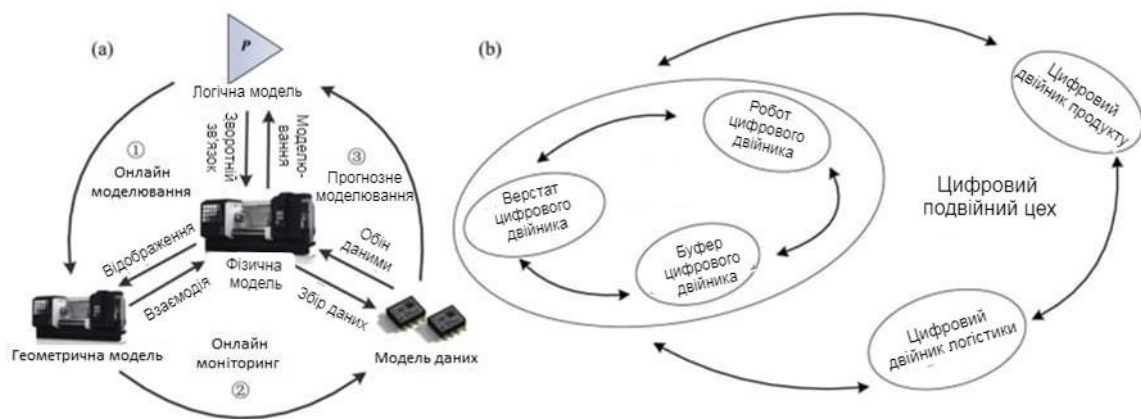


Рисунок 2.10 – Схема підключення [17]: а - пристрої цифрового двійника; та (b) цех цифрових двійників.

2.3. Цифровий двійник у складанні виробів

У прагненні досягти успіху в складанні виробів, дедалі очевиднішою стає необхідність прийняття інтегрованої парадигми моделювання структури та процесів. Ці конструкції вимагають комплексного підходу, що

виходить за межі традиційних методологій. Процес складання є не просто фізичним процесом інтеграції компонентів, він представляє собою синтез проектування, структурної цілісності та логістичної ефективності. Це вимагає злагодженої взаємодії між фізичним і цифровим світом, де матеріальна реальність поєднується з віртуальною.

Побудова цифрового двійника для складання виробів можна відобразити через дворівневе відображення. На нижньому рівні це буде включати відображення фізичної моделі на цифрове представлення обладнання, тоді як на верхньому рівні відображується реальний процес складання в цифрове представлення. Відображення на нижньому рівні усуває необхідність фізичного створення моделі обладнання, водночас спрощуючи аналіз раціональності конструкції та прогнозування її роботи. Відображення на верхньому рівні дозволяє планувати, перевіряти та оцінювати процеси складання обладнання.

Модель конструкції обладнання та процес складання, створені на основі ЦД, визначаються як **модель складання на основі ЦД для виробів (ЦД-В)**. ЦД-В поділяється на дві підмоделі: модель об'єкта складання на основі ЦД (ЦД-ОС) та модель процесу складання на основі ЦД (ЦД-ПС). ЦД-ОС включає моделі компонентів та відповідну інформацію для кожного етапу складання, а ЦД-ПС складається з плану процесу складання, включаючи послідовність складання, шлях складання та результати аналізу симуляції процесу складання.

ЦД-В відіграє ключову роль у зборі, обробці та аналізі інформації, пов'язаної зі складанням конструкцій, через різні фізичні поля, розміри та рівні деталізації протягом усього процесу складання. Це дозволяє оцінювати, моделювати та прогнозувати моделі та процеси складання, зрештою досягаючи мети узгодження реальних і віртуальних аспектів складних процесів складання. Це забезпечує точність та раціональність

реального процесу складання, сприяючи підвищенню точності складання та контролю процесу.

2.3.1. Модель об'єкта складання на основі цифрового двійника

У контексті складання конструкцій модель ЦД-ОС відіграє важливу роль як об'єкт відображення у віртуальному середовищі. Вона представляє складні сутності, задіяні в процесі складання. Для складання ЦД-ОС повинна охоплювати весь процес складання, забезпечуючи підтримку спільного проектування процесу та дозволяючи провести комплексний аналіз характеристик глобальної моделі. Це особливо важливо, враховуючи масштаб проектів складання, де точність та ефективність є основними факторами.

ЦД-ОС включає дані, починаючи від окремих компонентів і підсистем до всієї конструкції, що збирається, надаючи багаторівневий погляд на процес складання. Особливістю цієї моделі для виробів є інтеграція фактичних вимірюваних даних конструкцій, таких як інформація про модель хмари точок. Це поєднання загальноновживаних моделей САПР (CAD) і даних реальних вимірів забезпечує точність оцінки конструкцій та дозволяє проводити геометричні симуляції з високою точністю для різних сценаріїв складання.

На рисунку 2.11 показана схема реалізації технології складання на основі ЦД-В, яка підкреслює, як ЦД-ОС використовується для моделювання об'єктів складання у віртуальному середовищі.

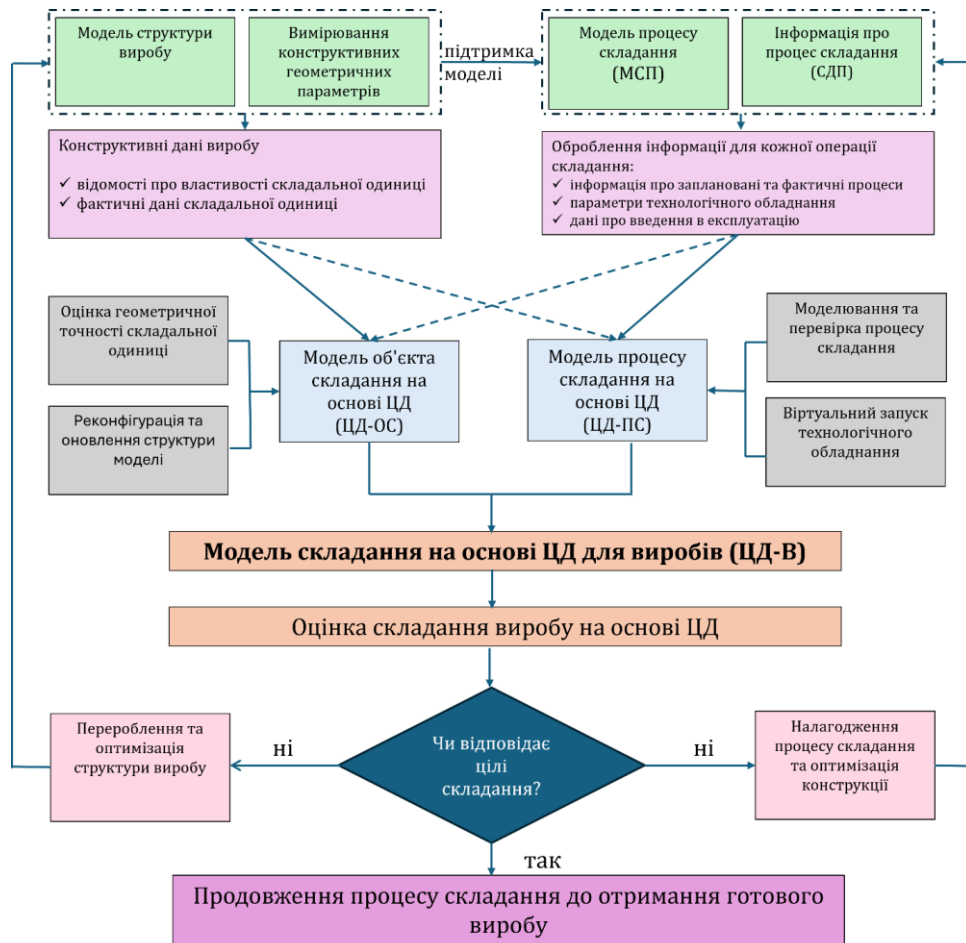


Рисунок 2.11. – Впровадження технології складання на основі ЦД-В.

2.3.2. Модель процесу складання на основі цифрового двійника (ЦД-ПС)

У контексті дискретного складання конструкцій, ЦД-ПС виступає незамінним мостом між цифровим і фізичним світами. Вона гармонізує інформацію моделі процесу, що базується на визначенні (Model-Based Definition), з даними процесу складання в режимі реального часу, отриманими з місця складання. Тут виникає унікальний виклик: масштаб і складність великих конструкцій вимагають детального поділу ЦД-ПС на дві ключові компоненти — модель складання в процесі (МСП) і дані процесу складання (СДП). Взаємозв'язок між ЦД-ПС, МСП та СДП можна представити наступним чином:

$$\text{ЦД} - \text{ПС} := \{\text{МСП}, \text{СДП}\}$$

МСП включає модель процесу складання для поточного завершеного складання та моделі деталей, які будуть зібрані в наступних кроках процесу. МСП ініціалізується на основі деталей, задіяних у першому процесі складання, і розвивається поетапно в міру просування фактичного процесу складання, доки не будуть завершені всі етапи. Еволюція МСП може бути виражена наступним чином:

$$\text{МСП}_i = \text{МСП}_{i-1} \cup \sum_{k=1}^n P(i, k)$$

де i позначає i -й процес складання, k позначає поточний крок складання в процесі, n представляє загальну кількість кроків для i -го процесу, а P означає деталі, зібрані на поточному етапі.

СДП включає всю інформацію процесу складання, яка вводиться в реальний процес складання, і складається з інформації про процес складання «як зібрано» (СДПС) і попередньо запланованої інформації про процес складання (СДПІ). Очевидно, що СДПС є оновленою версією СДПІ на основі фактичної ситуації складання, і сприяє створенню системи оптимізованого процесу складання продукту з зворотним зв'язком. Ця динамічна інтеграція даних є важливою для створення системи оптимізованого процесу складання. Таким чином, СДП визначається як колекція СДПІ та СДПС, а її правило відображення (ПВ) між фізичним і віртуальним просторами можна представити наступним чином:

$$\text{СДП} := \{\text{СДПІ}, \text{СДПС}, \text{ПВ}\}$$

2.3.4 Інформаційна модель об'єкта складання на основі ЦД

У контексті складання виробів процес розгортається охоплюючи різні фази та етапи. Ці етапи включають часткове та повне складання, що призводить до поступового формування структурних компонентів

всередині виробу. Враховуючи цей складний процес, ЦД-ОС має охоплювати всю інформацію про геометричний і фізичний стан цих компонентів протягом усього складання, що є вимогою для його ефективності.

Встановлення ЦД-ОС у різних агрегатах процесу складання вимагає ефективної інтеграції та узгодженого представлення багатодомної інформації для реальних деталей [22].

У контексті додатків складання виробу інформаційна структура ЦД-ОС, заснована на одиницях процесу складання, показана на рисунку 2.12 [22]. У межах кожного блоку процесу складання об'єкти, класифіковані як «будуть складатись», «складаються», і «після складання» та мають ієрархічну інформацію, узгоджену з тією самою архітектурою.

Інформаційна структура ЦД-ОС окреслює ієрархію інформації про структуру виробу, що містить інформаційний рівень геометрії та інформаційний рівень фізичних характеристик. Ця структура сприяє систематичному та комплексному представленню складання обладнання, охоплюючи важливі дані, пов'язані з геометрією та фізичними атрибутами для ефективних операцій складання.

Інформаційний рівень геометричного проектування в ЦД-ОС охоплює, серед іншого, критичні параметри структурних характеристик, геометричні розміри та допуски і дані реконструкції моделі. Ці компоненти разом забезпечують повне представлення структурної морфології, взаємозв'язків компонентів і розмірних помилок у цифровому просторі, підтримуючи основні функції, такі як візуалізація моделі, оцінка допуску та оновлення моделі на основі даних. Інформаційний рівень фізичних характеристик ЦД-ОС містить важливі атрибути, такі як розташування компонентів, властивості матеріалу конструкції та навантаження на складальну одиницю. Цей рівень надає моделі кілька фізичних атрибутів, включаючи кінематику, динаміку та термодинаміку, його використання

дозволить провести калібрування та аналіз механічних властивостей конструкції.



Рисунок 2.12. – Схема інформаційної структури об'єкта складання на основі складальних одиниць

Більше того, після отримання фактичної інформації про атрибути об'єктів-компонентів у фізичному просторі стає важливою інтеграція даних реальних даних у модель конструкції в цифровому просторі. Ця інтеграція змушує модель проходити ітеративне оновлення, забезпечуючи високий рівень узгодженості між побудованою цифровою моделлю та фактичною фізичною структурою. Отже, цей процес гарантує автентичність і точність подальшої роботи з моделювання та оптимізації на основі ЦД-ОС.

Основною метою процесу оновлення геометричних елементів є синхронізація геометричної форми ЦД-ОС із фактичним станом фізичної структури. Це особливо актуально для великих виробів, оскільки при цьому можуть легко виникнути відхилення між запланованими та реальними розмірами. Ці відхилення часто притаманні пов'язаним складним етапам розробки та виробництва деталей, таких як лиття,

зварювання та фрезерування. Ефективне усунення цих відхилень має важливе значення, оскільки вони можуть мати серйозні наслідки для вартості та часу доставки, особливо на етапі складання.

Оновлення ЦД-ОС ґрунтується на ключовій інформації, зібраній під час проектування структурного прототипу, виробництва та процесів складання. Спираючись на попередню роботу над методами оновлення геометричної моделі [28], реалізація процесу оновлення ЦД-ОС базується головним чином на двох технічних підходах: оновленні параметричної керуючої моделі та оновленні моделі, що відповідає вимірювальним даним.

Параметрична модель параметри, отримані з даних основних характеристик, отриманих шляхом визначення розмірів після завершення виробництва та обробки.

Цей метод зазвичай застосовується до деталей із простими структурами, наприклад великих плоских структур, які відносно легко реконструювати. У контексті складних і критично важливих структур компонентів перевагу має модель управління підгонкою даних вимірювань. Ця модель спирається на технологію моделювання підгонки хмари точок, в отриманні даних про поверхню та, зрештою, у створенні комплексної 3D-моделі шляхом обробки зібраних даних хмари точок [29]. Цей підхід стає незамінним при роботі з нестандартними компонентами зі складними поверхнями вільної форми. Загальне технічне рішення представлено на рисунку 2.13.

2.3.5 Інформаційна модель цифрового двійника процесу складання виробів

У сфері складання виробів ЦД-ПС бере на себе вирішальну роль цифрового представлення, що ретельно відображає фактичний процес складання структури виробів. Він охоплює повну інформацію про процес для кожного етапу складання, виконуючи основні функції, такі планування протягом усього процесу складання.

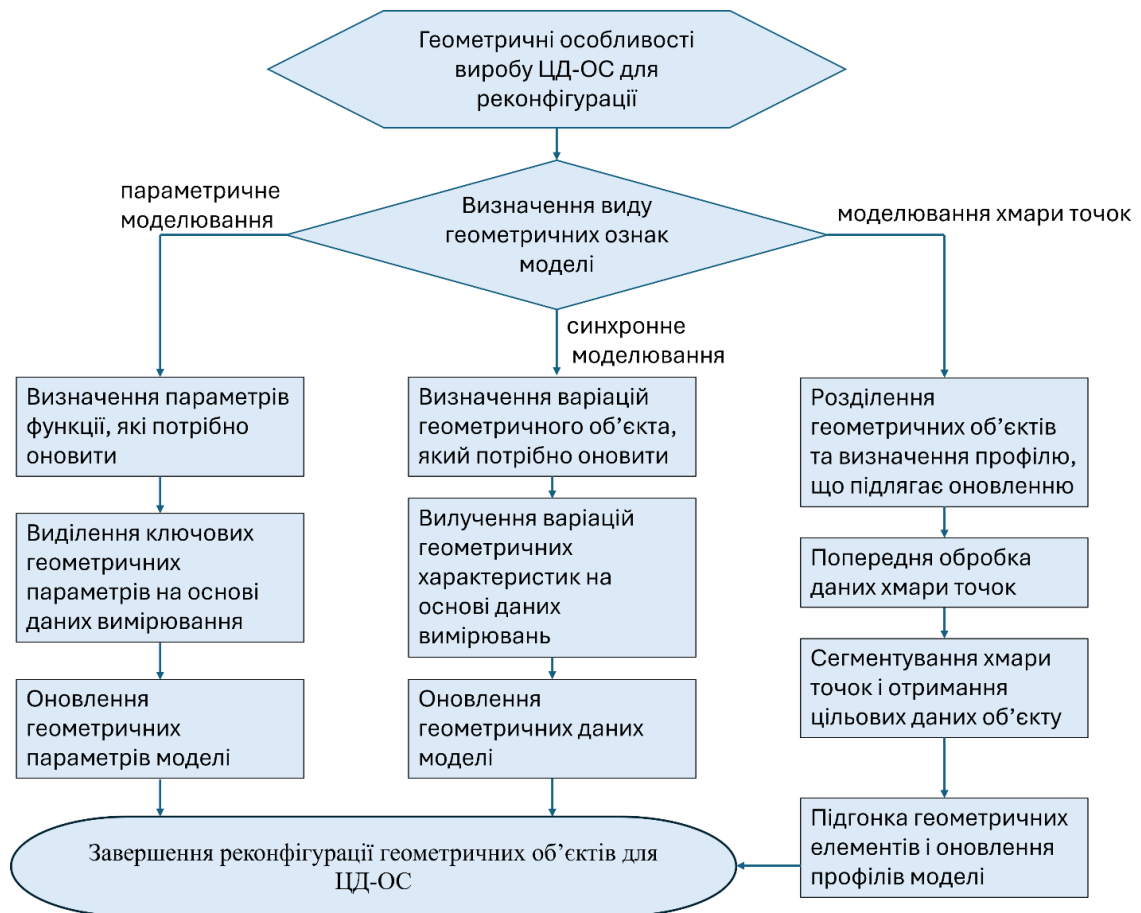


Рисунок 2.13. – Реконфігурація геометричних об'єктів для ЦД-ОС.

На рисунку 2.14 показано інформаційну архітектуру ЦД-ПС, яка базується на операціях складального процесу виробу. У цій архітектурній структурі кожна операція процесу складання є елементом ієрархічної інформаційної моделі, для об'єктів «будуть складатись», «складаються», і «після складання». Ця ретельна категоризація поширюється на ієрархію інформації про атрибути моделі процесу, яка далі підрозділяється на рівень інформації про поведінку складання та рівень інформації про правила складання. Така організація прокладає шлях до ефективного управління та оптимізації процесу складання.



Рисунок 2.14. – Діаграма інформаційної структури ЦД-ПС на основі блоків процесу складання

Інкапсульований у ЦД-ПС рівень інформації про поведінку складання особливо помітний для великих конструкцій. Він містить важливі деталі, включаючи структурну послідовність складання, методи з'єднання компонентів і операції процесу складання. Цей рівень забезпечує всебічне уявлення про функції структурного складання та атрибути процесу в моделі процесу, що дозволяє динамічне планування процесів і додатки автоматизації, засновані на моделі.

Інформація про правила складання, що міститься в ЦД-ПС, ресурсом для оптимізації процесу складання, та охоплює стандартні вимоги до процесу, знання експертного досвіду та розподіл ресурсів для складання, серед інших основних елементів. Завдяки використанню передових методів, таких як інтелектуальний аналіз даних і аргументація моделі знань, ця інформація розкриває загальні правила збирання та потенційні стратегії оптимізації. Таким чином, ЦД-ПС є фундаментальною основою

для прийняття розумних рішень і оптимізації рішень складання на основі моделі, ідеально узгоджуючи зі складнощами та масштабом великих складальних структур.

Інформація про атрибути в ЦД-ПС піддається синхронному відображенню та оновленню в реальному часі у відповідь на розвиток процесу складання. Ця функція дає змогу в режимі реального часу керувати та оптимізувати монтажні роботи на основі динамічних даних, які надає ЦД-ПС. У контексті великих зібраних конструкцій, де точність, адаптивність і ефективність мають першочергове значення, індивідуальне застосування інформаційної композиції ЦД-ПС стає основою успіху, пропонуючи комплексну структуру для вирішення унікальних завдань цих значущих проектів.

2.4. Інтелектуальна структура реалізації процесу складання

Протягом всього процесу, від фази проектування до виконання складання, інформація ЦД-ПС проходить окремі етапи, охоплюючи проектування та оптимізацію процесу, виконання процесу та зворотний зв'язок з місцем складання. На кожному етапі відповідна інформація про модель процесу зазнає ітераційних оновлень, кульмінацією яких є повний збір інформації ЦД-ПС. Базуючись на концепції інтерактивного відображення, яка з'єднує цифровий інформаційний простір і фактичний фізичний простір у межах технології ЦД, а також усвідомлюючи складний процес складання, унікальний для великих нестандартних конструкцій, розроблено для впровадження інтелектуальної технології складання, заснованої на ЦД-ПС. Ця структура та її різні компоненти проілюстровані на рисунку 2.15.

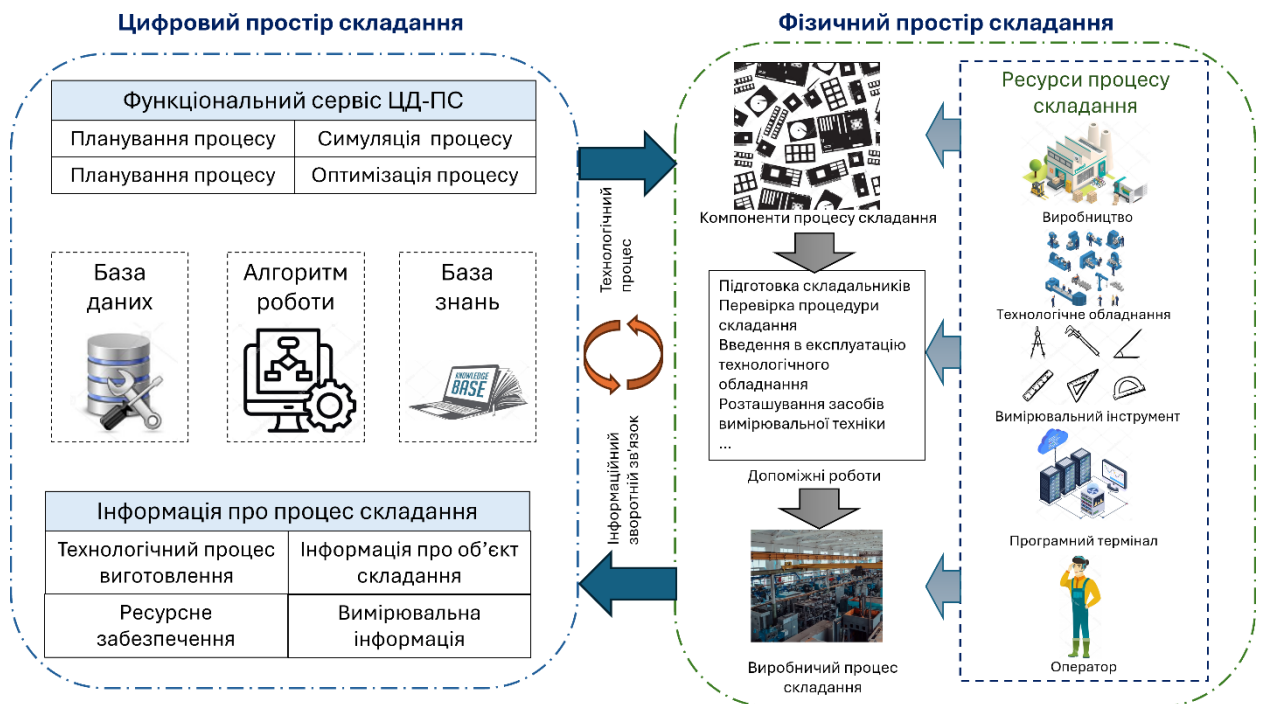


Рисунок 2.15. – Структура виробничого процесу складання на основі ЦД-ПС.

Структура технічної реалізації складається з двох основних компонентів: (1) цифровий простір складання та (2) фізичний простір складання. У просторі цифрового складання ресурси ЦД-ПС, алгоритми, керовані даними, інтелектуальні методи та технології, що керуються знаннями, використовуються для планування, моделювання, прогнозування та оптимізації процесу складання. Це полегшує цифрову допомогу та керівництво як для етапів проектування процесу, так і для виконання. Інформацію та дані моделі ДТ, що постійно змінюються, можна обґрунтувати та оновити шляхом інтеграції параметрів моделі, операційних даних і результатів прийняття рішень, що забезпечує самооновлення, самокоригування та саморозвиток моделі ЦД.

Фізичний простір для складання в структурі впровадження інтелектуального складання зосереджується на фактичному процесі складання великої конструкції обладнання. Він передбачає збір та інтеграцію інформації з багатьох джерел, такої як структурні компоненти,

програмні та апаратні інструменти та ресурси обладнання на місці складання, щоб точно описати фізичний стан елемента моделі ЦД. Це дозволяє точно описувати стан фізичного елемента в моделі ЦД, формуючи цифрове представлення реального стану процесу складання. Аналіз керівної інформації процесу, фізичний простір дозволяє виконувати такі дії, як моделювання послідовності складання, налагодження технологічного обладнання, розташування вимірювального інструменту та навчання операторів, а також інші допоміжні завдання зі складання.

Динамічна передача та передача інформації між цифровим і фізичним простором складання є основою для динамічного оновлення моделі ЦД, керування фізичним обладнанням у реальному часі та онлайн-оптимізації схем прийняття рішень. Ця інтеграція руйнує інформаційні бар'єри між віртуальним і фізичним простором, сприяючи безперебійному обміну та інтеграції даних і інформації, зрештою підвищуючи ефективність і результативність усього процесу інтелектуального складання.

Висновки до розділу 3

У другому розділі було проведено детальний аналіз концепції та методів створення цифрових двійників виробничих процесів. Особливу увагу приділено архітектурним підходам, стандартам та ідентифікації основних елементів виробничих систем, що є основою для ефективного впровадження цифрових двійників.

Цифровий двійник був представлений як багаторівнева система, що інтегрує фізичні об'єкти з їх цифровими копіями в єдину інформаційну екосистему. Особливо відзначено значущість цифрових двійників у контексті Індустрії 4.0, де вони забезпечують безперервний потік даних між реальними та віртуальними середовищами, дозволяючи здійснювати моніторинг, управління та оптимізацію виробничих процесів у режимі реального часу.

Детально розглянуто міжнародні стандарти, такі як IEC TS 62832, ISO 23247, IEEE P2806, які регламентують розробку цифрових двійників у виробництві. Описані моделі, такі як:

- **RAMI 4.0** — тривимірна модель, що охоплює життєвий цикл продукту, функціональні рівні і шари IT-архітектури;
- **GDTA (Generic Digital Twin Architecture)** — універсальна архітектура цифрового двійника, яка містить шість рівнів і забезпечує інтеграцію даних з фізичних і віртуальних об'єктів.

Ці підходи створюють основу для уніфікації процесів створення цифрових двійників та забезпечують високу сумісність між різними компонентами промислових систем.

Важливим етапом роботи стало вивчення структури фізичних виробничих систем та визначення основних компонентів для створення цифрових двійників.

Проаналізовано кілька типів архітектур ЦД, зокрема:

- Трирівневу архітектуру від Siemens, що включає фізичний світ, кіберпростір та бізнес-рівень.
- Чотирирівневу архітектуру китайських дослідників, яка передбачає фізичний рівень, рівень вилучення даних, кіберпростір і рівень взаємодії з користувачем.
- П'ятирівневу архітектуру (5D-DT), що включає фізичний об'єкт, віртуальний об'єкт, модель даних, модель обслуговування та зв'язок.

Ці архітектури надають можливість інтегрувати різноманітні компоненти виробничої системи в єдину модель і дозволяють ефективно управляти складними виробничими процесами.

Аналіз концепцій і архітектурних підходів дозволяє зробити висновок, що цифрові двійники є важливим інструментом для підвищення ефективності виробничих процесів, забезпечення їхньої гнучкості та надійності. Вони сприяють прогнозуванню можливих відмов, оптимізації ресурсів і швидкому реагуванню на зміни у виробничих умовах.

Таким чином, успішне впровадження цифрових двійників потребує комплексного підходу, що включає розробку стандартизованих архітектур, ідентифікацію ключових елементів виробничих систем та інтеграцію даних у реальному часі. Це створює підґрунтя для подальшого розвитку технології і розробки власної архітектури цифрового двійника складального виробництва в рамках даної дисертації.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ТА КОМПОНЕНТІВ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ВИРОБНИЧОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ СКЛАДАЛЬНИХ ОДИНИЦЬ

3.1. Вимоги до цифрового двійника складального виробництва

Цифровий двійник складального виробництва повинен виконувати наступні функції:

- оптимізація процесу виробництва за рахунок виявлення та усунення «вузьких» місць;
- аналіз та контроль якості виробів;
- контроль часу проходження складальних одиниць та деталей по місцях складання, відповідно до технологічного процесу;
- керування технологічним процесом в режимі реального часу;
- регулювання параметрів технологічних параметрів;
- прогнозування зупинок роботи технологічної лінії;
- контроль відмов роботи обладнання;

Оскільки, ще не сформовано єдиний архітектурний підхід до опису структури ЦД, але всі наявні архітектурні підходи є доменно-специфічними та відокремлюють шари в залежності від поставлених задач, то за основу візьмемо підхід еталонної архітектури на виробництві, який буде розширено за допомогою додаткових шарів.

У цьому підході не виділяється бізнес-шар та комунікаційний шар з архітектури GDTA, однак ці шари важливі для схематичного верхньорівневого відображення. Таким чином, в архітектурному підході виділимо такі шари: бізнес-шар, частина користувача, основний шар (ядро ЦД), модуль збору даних і управління, комунікаційний шар, фізичний шар. В основному шарі (ядрі) повинні бути описані модулі: експлуатації та управління, сервіси та програми, доступ та обмін даними.

При створенні ЦД процесу складального виробництва, будемо орієнтуватись на наступні вимоги:

1. Тип ЦД: цифровий двійник технологічного процесу на виробництві
2. Архітектурний підхід: при розроблені ЦД повинні бути описані шари – бізнес-шар, шар користувача, ядро ЦД, модуль збору даних та керування, комунікаційний шар, фізичний шар.
3. Бізнес-шар: представляється логіка процесу у вигляді його послідовності
4. Збір даних: повинен бути реалізований модуль, який отримує дані з виробництва та їх оброблення для передачі в ядро ЦД.
5. Представлення даних: дані, які збираються та передаються, повинні бути представлені в у форматі, що може обробити людина або програмний засіб.
6. Зберігання даних: реалізується зберігання даних, які отримані з різних елементів ЦД, для їх подальшого моделювання, аналізу тощо. Зберігання може бути як тимчасовим, так і постійним.
7. Ядро ЦД: повинно проводитись оброблення та обчислення, та реалізовані модулі експлуатації й керування, сервіси та застосунки, доступ та обмін даними.
8. Швидкість роботи ядра ЦД: всі обчислення та операції, повинні проводитись швидко без навантаження на систему.
9. Модуль експлуатації та керування: повинна бути передбачена можливість цифрового моделювання, технічного обслуговування, представлення та синхронізації віртуальної моделі.
10. Цифрове моделювання: для створення віртуального елемента, повинно використовуватись імітаційне моделювання виробництва.
11. Імітаційна модель повинна здійснювати пошук «вузьких» місць та оптимізацію технологічного процесу, аналізувати та контролювати виробу. В

12. В імітаційній моделі повинна бути передбачена можливість корегування параметрів технологічного процесу.
13. Імітаційна модель повинна здійснювати прогнозування зривів роботи виробництва.
14. Імітаційна модель повинна формувати вихідну статистику
15. Модуль сервісів та застосунків: повинна бути передбачена можливість емуляції заданого процесу на виробництва, аналіз даних імітаційної моделі, створення звітів.
16. Передача даних: повинен бути реалізований модуль, який здійснює попередню обробку даних з ядра ЦД та їх передачу у фізичний шар.
17. Частина користувача: для відображення інформації можуть бути реалізовані окремі інтерфейси користувача.
18. Вимоги до інформації, яка передається: повинна бути актуальною та передана за найменший можливий час, який близький до реального, бути цілісною та повною. Передаватись по захищеним каналам.
19. Сумісність: всі розроблені модулі в різних шарах повинні бути сумісними та синхронізованими між собою.
20. Масштабуємось: при створенні ЦД необхідно враховувати збільшення та складність процесів на виробництві.

3.2. Цифровий двійник складального виробництва

Складальне виробництво це традиційний підхід до виготовлення виробів, який розбивається на багато етапів, де кожен з них відповідає за частину робіт. Але кожному етапу бракує розуміння вимог та можливостей інших етапів, тобто відмінності та протиріччя знижують ефективність виготовлення виробу. Розробникам продукту складно врахувати вимоги клієнту, технологію виробництва, контроль якості та інші фактори в

процесі проектування. Тому використання логіки проектування ЦД складального виробництва, який враховує всі етапи виготовлення виробу, дозволить скоординувати роботу всіх етапів від проектування до готового виробу (рис. 3.1).

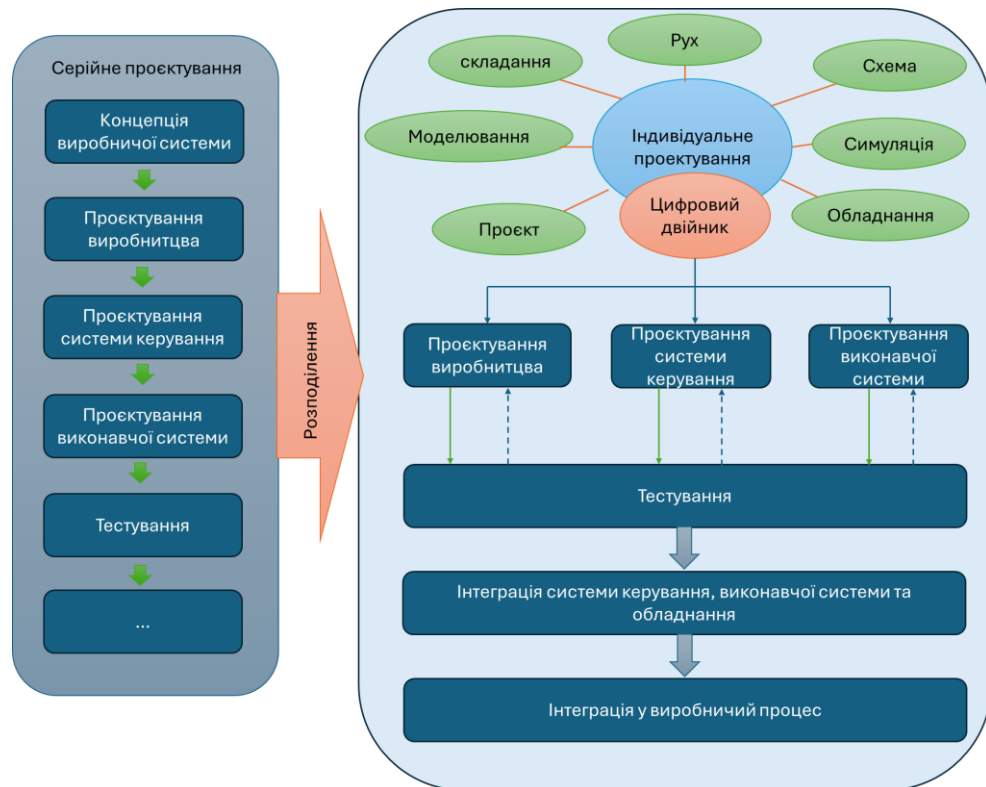


Рисунок 3.1. – Логіка проектування цифрового двійника складального виробництва

Цифровий двійник складального виробництва представляє собою систему керування, яка забезпечує контроль за процесом виробництва, а також його моделювання та симуляцію. Таким чином, він емулює поточний стан виробництва та відстежує потік незавершеного виробництва. Складальне виробництво, зазвичай, створюється за технологічним принципом, як послідовність операцій відповідно до маршруту складання. Коли деталі потрапляють на місце складання, то робота на цьому місці не залежить від того, що відбувається поза ним. Тобто кожне місце складання можна представити як окремий модуль. Тоді, у випадку створення цифрового двійника складального виробництва, його можна представити

як сутність, в якій кожне окреме місце складання буде представлено, як окрема сутність вбудована у цифровий двійник складального виробництва. Коли заготовка прибуває на станцію, робота на станції здебільшого не залежить від того, що відбувається поза цією станцією.

В загальному вигляді ЦД складального виробництва можна представити наступним чином (рис. 3.2): ЦД виробничого процесу складання охоплює ЦД місць складання, кількість яких залежить від технологічного процесу складання виробу та ЦД деталей та/або складальних одиниць, які складаються на даній операції технологічного процесу.



Рисунок 3.2. – Загальний вигляд цифрового двійника складального виробництва

Цифровий двійник місця складання повинен відстежувати рухи людини-оператора, а також рух деталей та/або складальних одиниць при їх складанні, та оскільки, операція складання є фактичною еволюцією виробу, то ретельне відстеження цього процесу є головною метою контролю за

складанням. Таким чином, ЦД місця складання повинен бути в тісному контакті з цифровим двійниками деталей та/або складальних одиниць, щоб відстежувати та контролювати їх розвиток та операції, які вони проходять. Цифровий двійник виробничого процесу складання є контролем верхнього рівня, на який потрапляє інформація від всіх місць складання (наприклад, час складання, час простою, інформація про стан обладнання та інструменту тощо), що дозволяє відстежувати вузькі місця виробничого процесу та вчасно реагувати на зміни й оцінювати вплив технологічного обслуговування місць складання, в незалежності від його виду (планове або пов'язане з несправністю).

Цифровий двійник виробничого процесу складання за своїм визначенням повинен надавати, в режимі реального часу, поточний стан всіх місць складання, які входять до його складу, тобто мати з ними канали зв'язку, що можна досягти за допомогою опитування, багатопоточності тощо. Крім того, для забезпечення модульності, ЦД виробничого процесу складання є єдиним каналом зв'язку «до» та «з» будь-якого місця складання (за винятком ЦД деталей та/або складальних одиниць), тобто здійснює матеріально-технічний зв'язок між місцями складання. Через канали зв'язку можуть надходити повідомлення від місця складання до ЦД виробничого процесу складання, такі як про прибуття деталей та/або складальних одиниць (час прибуття, ідентифікатор продукту, тип), відправлення готової складальної одиниці або виробу (час), необхідне наповнення кріпильними елементами/матеріалами (ідентифікатор, кількість), відсутність необхідних деталей/матеріалів (час, ідентифікатор деталі) тощо. Від ЦД виробничого процесу складання до місця складання можуть надходити повідомлення про аварійні ситуації, переміщення поточної складальної одиниці на інше місце складання, поповнення деталей, матеріалів в дорозі (ідентифікатор, кількість, час прибуття). Якщо

між місцями складання є буферні зони, то ЦД виробничого процесу складання також відстежує їх стан за списком ідентифікаторів.

Основні операції складання проводяться на місцях складання, тобто відбувається перетворення деталей та/або складальних одиниць в готовий виріб. Кожна деталь та/або складальна одиниця має цифровий двійник, який містить інформацію про всі поверхні, матеріали, зв'язки з іншими деталями та дії, які необхідні для їх перетворення в готовий виріб.

Для уникнення помилок в складанні компонентів та врахування зовнішніх впливів, які можуть істотно вплинути на готовий виріб, необхідно інтегрувати в ЦД інформацію про геометричні та фізичні характеристики об'єкту складання. Для цього виконується інформаційне моделювання характеристик, як показано на рис. 3.3.



Рисунок 3.3. – Процес злиття геометричної та фізичної інформації про виріб, який складається

Такий підхід спрямований на створення комплексного та точного ЦД-ОС, та дозволяє цілісно відобразити процес складання у віртуальному виробництві в режимі реального часу.

На рисунку 3.4 представлено систему моніторингу ЦД виробничого процесу складання. Інформація про фізичний стан складального виробництва повертається до моделі в режимі реального часу, що забезпечує моніторинг виробництва. На основі ЦД виробничого процесу складання в збирається інформація про стан виробництва (роботу обладнання, робітників, наявність матеріалів на місцях складання тощо),

після чого дані передаються у систему керування виробництвом. Система керування виробництвом видає операційні інструкції на виробництво, збирає та завантажує дані в режимі реального часу. Система керування кожною одиницею перетворює операційні інструкції в інструкції з експлуатації та надсилає їх через диспетчерський контроль на керування виробництвом. В той самий час, інформація про стан фізичного обладнання та цифрової моделі, завантажується в диспетчерський контроль через мережу контролю та керування. Далі ці дані надсилаються в систему керування виробництвом, і таким чином утворюється замкнена мережа передачі даних.



Рисунок 3.4. - Система моніторингу ЦД виробничого процесу складання

3.3. Імітаційна модель складального процесу на основі ЦД

Розглянемо укрупнену імітаційну модель складального процесу та , реалізуємо її в системі FlexSim (рисунок 3.5).

Складання виробу відбувається 4 технологічних лініях (Місце складання). Всі лінії забезпечують формування кінцевого виробу (елемент «Вихід»)

У цій моделі кожна продуктова компонента (комплектуюче) є агентом зі своїми індивідуальними характеристиками. Наприклад, якщо це каркас виробу, то він має певні розміри та інші задані технічні характеристики.

На основі варіювання набору агентів-комплектуючих, що надходять на вхід, забезпечується виробництво різних типів виробів на виході системи (елемент «Пакування»). При цьому для комплектуючих окремих типів зі своїми індивідуальними характеристиками виконується динамічна синхронізація з використанням спеціального елемента, що забезпечує розміщення агентів-комплектуючих у черзі та знаходження пар агентів, що задовольняють заданий критерій відповідності (елемент «Синхронізатор»). В результаті агенти-комплектуючі, що відповідають деяким заданим критеріям, відправляються на складання, при цьому інші агенти-комплектуючі залишаються в черзі, або витісняються з неї (на зберігання).

Одним із можливих прикладів аналізу стійкості виробничого процесу за допомогою розробленої імітаційної моделі є залежність загальної кількості виробів, що складаються, від динаміки поставок агентів-комплектуючих.

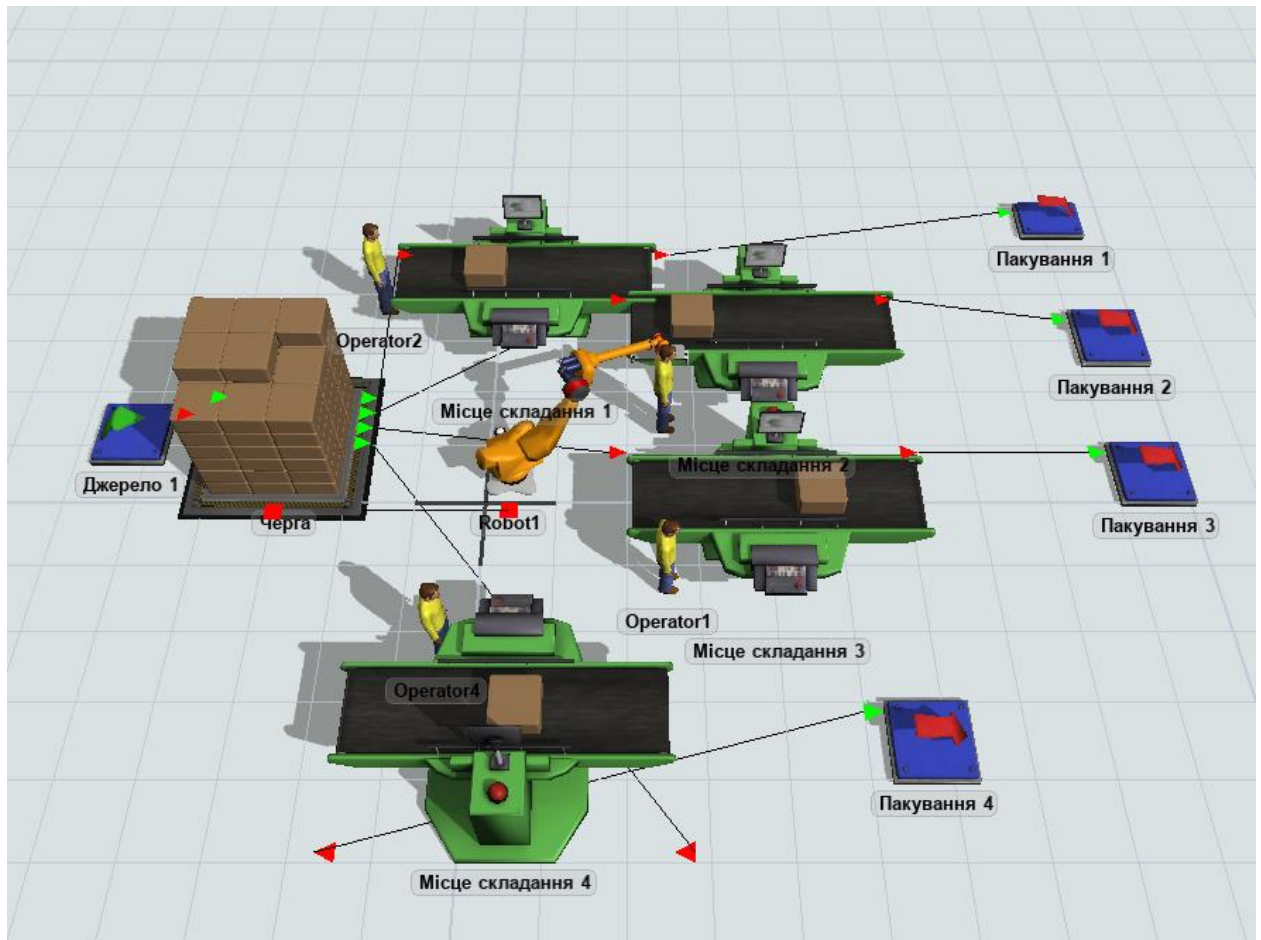


Рисунок 3.5. – Імітаційна модель процесу складання на основі цифрового двійника

Результат моделювання та моніторингу роботи складального виробництва можна досліджувати за допомогою діаграм, на рисунках 3.6 та 3.7 відповідно показано ефективність роботи місць складання та стан роботи місць складання з виготовлення виробів. На рисунку 3.9 показано результати моніторингу складання виробів за кожним місцем складання.

З наведеного аналізу можна зробити висновок, що самим ефективним є Місце складання 1 (ефективність роботи становить 89,62%), найгірший показник у Місця складання 4 (47,3%), це пов'язано з тим, що на це місце комплектуючі надходять в саму останню чергу, при всіх інших рівних умовах. Ситуацію можна виправити встановленням додаткового оператора для розподілу елементів на місця складання.

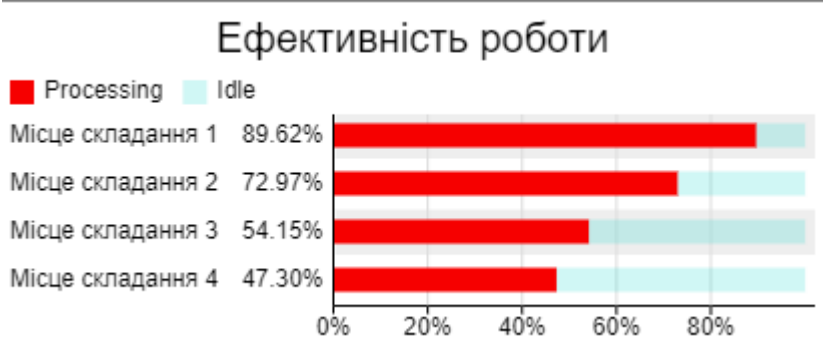


Рисунок 3.7. – Ефективність роботи місць складання

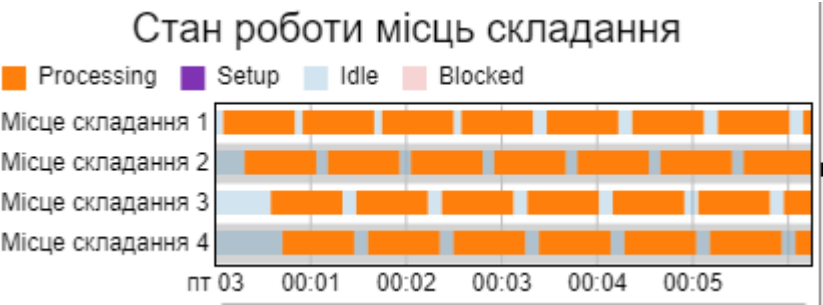


Рисунок 3.8. – Стан роботи місць складання

Кількість готових виробів

Object	Throughput
Пакування 1	11
Пакування 2	11
Пакування 3	10
Пакування 4	10

Рисунок 3.9. – Кількість готових виробів

Висновок до розділу 3

У третьому розділі було проведено розробку архітектури та компонентів цифрового двійника для виробничого процесу складання. Зосереджено увагу на визначенні вимог до цифрового двійника, створенні імітаційної моделі складального процесу та структурі взаємодії між фізичними і цифровими компонентами системи.

У ході дослідження було сформульовано ключові вимоги до цифрового двійника, які забезпечують його ефективне функціонування в умовах сучасного виробництва:

- Модульність та гнучкість — цифровий двійник має підтримувати швидку адаптацію до змін у виробничому процесі, включаючи заміну компонентів або переналаштування обладнання.
- Реалізація в реальному часі — важливою вимогою є забезпечення синхронного оновлення даних між фізичним і цифровим просторами для моніторингу стану виробництва в реальному часі.
- Інтеграція з існуючими системами — цифровий двійник повинен мати можливість інтеграції з системами управління виробництвом (MES), ERP та іншими корпоративними платформами.
- Підтримка передиктивного обслуговування — здатність передбачати відмови обладнання та планувати обслуговування на основі аналізу даних.

На основі визначених вимог була запропонована архітектура цифрового двійника, яка включає такі ключові рівні:

- Фізичний рівень — реальні об'єкти виробничого процесу, такі як обладнання, інструменти та робочі станції.
- Рівень збору даних — датчики і пристрої збору інформації, що забезпечують безперервний потік даних про стан обладнання та параметри процесу.

- Кібернетичний рівень — аналітичні модулі та моделі, що дозволяють моделювати процеси складання, проводити симуляції та аналізувати сценарії.
- Рівень взаємодії з користувачем — інтерфейси для візуалізації, моніторингу та управління процесом з боку операторів і менеджерів.

Ця архітектура забезпечує ефективну взаємодію між фізичними і цифровими компонентами виробничої системи, дозволяючи оптимізувати процеси в реальному часі.

Імітаційна модель складального процесу була розроблена для тестування та оцінки ефективності цифрового двійника. Вона охоплює такі аспекти:

- Моделювання потоків матеріалів і ресурсів — оптимізація розподілу ресурсів і маршрутів переміщення компонентів.
- Аналіз сценаріїв та ризиків — проведення симуляцій позаштатних ситуацій для виявлення можливих проблем і шляхів їх вирішення.
- Оцінка продуктивності та ефективності — моделювання різних варіантів організації складального процесу з метою визначення оптимальної стратегії.

Було визначено, що успішна робота цифрового двійника можлива лише за умови безперервного обміну даними між фізичною та цифровою частинами. Це включає:

- Збір даних — від датчиків, що відстежують стан обладнання, параметри температури, тиску, навантаження тощо.
- Зворотний зв'язок — передача команд і сигналів управління від цифрової системи до фізичних пристроїв для коригування роботи в реальному часі.
- Аналіз даних — використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування збоїв та оптимізації процесів.

Запропонована архітектура цифрового двійника дозволяє значно підвищити ефективність і гнучкість складального виробництва. Це забезпечує:

- скорочення часу простою обладнання завдяки передиктивному обслуговуванню;
- підвищення якості продукції за рахунок моніторингу критичних параметрів у реальному часі;
- оптимізацію використання ресурсів і зниження витрат на виробництво.

Таким чином, продемонстровано, що створення цифрового двійника виробничого процесу складання є важливим кроком для забезпечення конкурентоспроможності підприємств у сучасних умовах. Запропонована архітектура і компоненти цифрового двійника створюють основу для подальшої інтеграції цієї технології у реальне виробництво, що дозволить досягти значного підвищення продуктивності та ефективності виробничих процесів.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК СКЛАДАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА»

4.1 Опис ідеї стартап-проєкту

В розділі буде проаналізовано стартап-проєкт «Цифровий двійник складального виробництва» на основі проведеного дослідження під час виконання випускної кваліфікаційної роботи, в якій розглянуто створення цифрового двійника для складального виробництва. Ідея проєкту полягає у формуванні архітектури та розроблення компонентів цифрового двійника виробничого процесу складання. У таблиці 4.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Цифровий двійник складального виробництва.	1. Промислове виробництво	Віддалений моніторинг та швидке реагування на відмови у обладнання у виробничому процесі в режимі реального часу
	2. Контроль якості виробів	
	3. Моніторинг виробничого процесу	

Запропонована архітектура та компоненти цифрового двійника, дозволить створити віртуальну копію виробничого процесу складання виробу, для його оптимізації та моніторингу в режимі реального часу. Проведемо аналіз техніко-економічних переваг представленої ідеї стартап-проєкту в порівнянні з пропозиціями конкурентів (таблиця 4.2). До аналізу входить:

- визначення набору техніко-економічних параметрів і характеристик для запропонованої ідеї;
- формування попереднього переліку конкурентних проєктів або товарів-аналогів і замінників, що вже присутні на ринку, а також збираємо дані щодо техніко-економічних показників як для нашої

ідеї, так і для потенційних конкурентів згідно із сформованим набором параметрів;

- здійснення порівняльного аналізу показників: для власної ідеї виокремлюємо показники, які мають а) нижчі значення (W, слабкі); б) схожі (N, нейтральні); в) вищі значення (S, сильні) [31].

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W	N	S
		Мій проєкт	Digital Enterprise, Simens	Manufacturing Execution System, IT-Enterprise			
1.	Інтеграція зі встановленим обладнанням	Наявна	Виключно для обладнання Simens	Продиться виключно фахівцями IT-Enterprise, для визначеного виробництва	-	-	+
2.	Швидкість аналізу	Висока	Висока	Висока	-	-	+
4.	Використання у реальному часі	Присутня опція	Присутня опція	Присутня опція	-	+	-
5.	Комплексне моделювання та симуляція	Наявне	Наявне	Наявне	-	-	+
6.	Період встановлення та налаштування системи	1 місяць	3 місяці	2 місяці	-	-	+

Аналіз показує, що система «Цифровий двійник складального виробництва» має значні переваги над розробками конкурентів, а саме може бути використано для будь якого обладнання з короткий проміжок часу, має високу швидкість аналізу у реальному часі, дозволяє проводити комплексне моделювання та симуляцію виробничого процесу складання будь яких виробів, в той час як, розроблені системи конкурентів працюють виключно з визначеним виробничими процесами.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Проведемо аудит технологій, які можуть бути використані для реалізації ідеї проєкту, а саме технології створення цифрових двійників виробничих процесів, технології аналізу даних отриманих за допомогою цифрового двійника, комплексні можливості для моделювання та симуляції, інтеграція зі встановленим обладнанням.

Для реалізації проєкту обрано технологію створення цифрових двійників виробництва. Дана технологія дозволяє створювати цифрові двійники, як для окремих елементів виробничого процесу складання (операцій), так й для процесу в цілому. Також, розроблення цифрового двійника дозволить здійснювати моніторинг та контроль виробничого процесу, проводити комплексне моделювання та симуляцію для вдосконалення виробництва.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Цифровий двійник складального виробництва	Технології створення цифрових двійників виробничих процесів	Наявна, потребує вдосконалення	Доступна частково з обмеженим обладнанням
		Технології аналізу даних отриманих за допомогою цифрового двійника	Наявна	Доступна авторам
		Комплексні можливості для моделювання та симуляції	Наявна	Доступна авторам
		Інтеграція зі встановленим облднанням.	Потребує розробки	Доступність обмежена
Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: комплексне моделювання та симуляція виробничого процесу складання на основі розробленого цифрового двійника виробничого процесу складання				

Аналіз таблиці 4.3. показав, що стартап проєкт технологічно здійснений. Більшість технологій, необхідних для реалізації проєкту, є доступними на ринку, а також можуть бути використані авторами проєкту. Водночас деякі елементи, такі як інтеграція зі встановленим обладнанням, потребують додаткових ресурсів або вдосконалення для повної відповідності вимогам проєкту.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту

Для визначення перспектив впровадження проєкту на ринку важливо провести аналіз ринкових можливостей і загроз.

Визначимо ринкові можливості та загрози, що можуть вплинути на реалізацію проєкту, що дозволить зрозуміти потреби потенційних клієнтів, спланувати напрямок розвитку та оцінити проєкти конкурентів. В світі багато компаній займають розроблення та впровадженням цифрових двійників у виробництво, але в Україні широко представлені Siemens Digital Industries та IT-Enterprise.

Проведений аналіз показав, що ринок має тенденцію до зростання використання технології цифрових двійників, але є мало компаній, які працюють з потенційними клієнтами в Україні, тому це дає змогу вільно ввійти на ринок. Визначимо потенційних клієнтів, котрим будемо пропонувати нашу систему

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап проєкту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Не відомий
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	100%

Для цього визначимо основні групи клієнтів та їхні вимоги до товару, і представимо їх у таблиці 4.5. Це дозволить зорієнтувати проєкт на конкретні потреби ринку та краще адаптувати продукт під очікування цільових сегментів.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Отримати статистику про виробництво, або технологічні продукти у реальному часі, мати можливість оперувати даними	підприємства	Фокус на точності результатів моделювання та симуляції	Детальний аналіз усіх ресурсів,.
2		Логістичні компанії	Потреба в автоматизації процесів	Простота у використанні, швидкість аналізу
3		Промислові виробництва	Акцент на дотримання норм часу	Детальний аналіз усіх ресурсів

В таблиці 4.5. описано фактори, які формують поведінку користувачів відносно «Цифровий двійник складального виробництва» та їх основні вимоги до нього. Основна цільова аудиторія це підприємства, логістичні компанії та промислові виробництва, які потребують автоматизацію процесів або на складах або виробництва. При застосуванні даної технології існують певні загрози, тож буде доцільно провести аналіз факторів ризику та можливостей при виведенні товару на ринок.

При ринковому впровадженні технології існують певні загрози, пов'язані з обмеженнями та ризиками, які можуть негативно вплинути на реалізацію проєкту. У таблиці 4.6 зведено основні фактори ризику для стартап-проєкту, можливі загрози та шляхи їхнього мінімізації.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Введення на ринок інших інноваційних систем	Поява продукції на ринку із суттєвішими перевагами	Постійна робота над вдосконаленням товару та періодичне оновлення програмного забезпечення; маркетингова діяльність.
2	Копіювання методу	Можливість використання конкурентами такого самого програмного забезпечення	Захист методу патентом, а також захист у правовій сфері України
3	Конкуренція з великими компаніями	Може ускладнити вихід на ринок	Фокус на нішеві ринки і унікальні властивості товару
4	Швидкий розвиток технологій	Існує ризик швидкого старіння продукту	Оновлення технології та постійне вдосконалення
5	Відсутність початкового попиту	Не бажання переходити на нові технології	Наведення аргументованих доказів

Виявлені ризики демонструють, що проєкту можуть перешкоджати високі виробничі витрати, швидке старіння продукту та конкуренція. Для зниження цих ризиків доцільно зосередитися на вдосконаленні процесів виробництва, зайнятті нішевих ринків і постійній модернізації продукту. Такий підхід сприятиме підвищенню конкурентоспроможності та довгостроковій стабільності.

Окрім, потенційних загроз, існують ринкові можливості, які можуть сприяти успішному впровадженню «Цифровий двійник складального виробництва», тому наведемо ключові можливості, які можна використати для підвищення конкурентоспроможності стартапу (таблиця 4.7). Зокрема, розглянемо потенційне розширення ринку, перспективи для інновацій та інші чинники, які можуть мати позитивний вплив на розвиток продукту.

Ринкові можливості свідчать про високий потенціал для розвитку «Цифровий двійник складального виробництва», зокрема для промислових виробництв та науково-дослідного сектору.

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливостей	Можлива реакція компанії
1	Менша вартість ніж у відомих конкурентів	У відомих конкурентів висока вартість розробки цифрових двійників під замовлення	Збільшення оборотності послуг
2	Технічні конференції, виставки, семінари, соціальні мережі	Демонстрація роботи та можливостей розробленого цифрового двійника	Написання оглядових статей в журнали галузі, розміщення постів у тематичних групах соціальних мереж, розповсюдження рекламної продукції
3	Підтримка наукових досліджень	Підвищення державного фінансування інноваційних досліджень	Подання проєкту на гранти та програми фінансування
4	Можливість міжнародної співпраці	Вихід на іноземні ринки з подібними потребами	Розширення експорту та партнерства

Розширення ринків і підтримка з боку держави, а також отримання міжнародних грантів, можуть забезпечити додаткові шляхи розвитку та збільшити рентабельність. Важливим кроком буде адаптація продукту під вимоги різних галузей, що допоможе значно розширити потенційну клієнтську базу.

Щоб визначити, які конкурентні переваги можна використати, а також які загрози потрібно врахувати, проведемо ступеневий аналіз конкуренції. У таблиці 4.8 наведено основні аспекти конкурентного середовища, їх прояв та можливий вплив на діяльність стартап проєкту.

Із наведеного вище можна зробити висновок, що на ринку панує вільна конкуренція в межах локальних масштабів, що свідчить про відсутність факторів, що однозначно обмежують можливість вступу на ринок. Детальніші умови конкуренції наведено в Таблиці 4.9.

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції: олігополія	Наявність 2 прямих конкурентів	Зменшення ціни продукту та розширення параметрів для моделювання та симуляції
За рівнем конкурентної боротьби: глобальний	Високий рівень автоматизації та точності у конкурентів	Інвестування в автоматизацію та покращення технологічної бази
За галузевою ознакою	Міжгалузева	Врахування особливостей кожної з галузей, де розповсюджується стартап.
Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Можлива конкуренція між постачальниками схожих за функціоналом продуктів	Наявна система більш автоматизована ніж конкурентні та спроможна задавати тренд використання
За характером конкурентних переваг: цінова та нецінова	Цінова – зробити продукт доступнішим ніж в конкурентів, нецінова – полягає в високій якості наданих послуг, вдосконалення алгоритму аналізу даних	Цінова – зекономити за рахунок більш оптимізованих алгоритмів обробки. Нецінова – широкі можливості застосування у різних галузях
За інтенсивністю: марочна	Компанії-конкуренти пропонують подібний продукт	Забезпечення масштабованості стартапу в найближчій перспективі для створення стійкого сприйняття стартапу як окремої бізнес одиниці.

Для детальнішого розгляду конкурентного середовища проекту скористаємося моделлю М. Портера. Дана модель визначає п'ять ключових чинників, які впливають на привабливість ринкового вибору з урахуванням особливостей конкуренції.

До них належать: конкурент, що вже є у галузі, потенційні конкуренти, наявність товарів замінників, постачальники, що конкурують за ринкову владу та споживачі [32]. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером представлено у таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Siemens Digital Industries, IT-Enterprise	Існує ризик появи нових гравців, які впроваджують новітні технології	Обмежений вибір постачальників послуг з розроблення цифрових двійників	Різноманітні галузі, що вимагають високої якості	Альтернативні методи моделювання та симуляції виробничих процесів
Висновки	Концентрація на унікальних характеристиках продукту, які не пропонують конкуренти	Постійна модернізація для збереження конкурентоспроможності	Забезпечення альтернативних постачальників для надійності	Оцінка та врахування специфічних потреб кожного сегмента ринку	Створення переваг за точністю та швидкістю роботи для випередження замінників

Проведений аналіз за моделлю Портера показує, що «Цифровий двійник складального виробництва» здатен зберігати конкурентоспроможність завдяки унікальним характеристикам та швидкій адаптації до змін ринку. Стратегічний акцент на надійність постачання та орієнтацію на вимоги клієнтів допоможе зміцнити позиції проєкту в умовах конкуренції.

Після всіх проведених аналізів важливо визначити та обґрунтувати перелік факторів конкурентоспроможності для стартапу, що дозволить виокремити ключові характеристики, які роблять продукт конкурентоспроможним і забезпечують йому ринкові переваги. Основні фактори конкурентоспроможності, які є важливими для успішного впровадження та розвитку стартапу «Цифровий двійник складального виробництва» представлено у таблиці 4.10, після чого здійснимо аналіз переваг і недоліків стартап-проєкту (таблиця 4.11) на основі визначених чинників конкурентоспроможності (таблиця 4.10).

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Візуалізація процесу виробництва	Візуалізація процесу виробництва дозволить контролювати час виконання операції відповідно до технологічного процесу, проводити його моделювання та симуляцію, що може допомогти при вирішенні стратегічних рішень.
2	Зручність у користуванні	Інтерфейс цифрового двійника розроблено інтуїтивно, що мінімізує час навчання і підвищує ефективність використання.
3	Сучасні технології	Використання інноваційних технологій підвищує ефективність, швидкість обробки даних та загальну надійність системи.
4	Підтримка та сервісне обслуговування	Надається постійна технічна підтримка та обслуговування для забезпечення стабільного функціонування продукту.
5	Вартість	Адекватна цінова політика робить продукт доступним для споживачів різних сегментів.

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Цифровий двійник складального виробництва»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «Цифровий двійник складального виробництва»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Візуалізація процесу виробництва	17						+	
2	Зручність у користуванні	18					+		
3	Сучасні технології	16							+
4	Підтримка та сервісне обслуговування	19					+		
5.	Вартість	18			+				

З таблиць 4.10 та 4.11 видно, що фактори конкурентоспроможності стартап-проекту «Цифровий двійник складального виробництва» є значними і мають великий позитивний внесок при його впровадженні на промислових виробництвах. Основними перевагами проекту є висока

візуалізація процесу виробництва, зручність у користуванні, сучасні технології, а також підтримка та сервісне обслуговування на протязі всього терміну використання продукту споживачем, що забезпечує суттєві конкурентні переваги на ринку.

Тепер необхідно провести SWOT-аналіз стартап-проекту. Суть такого аналізу полягає у тому, що він зосереджений на співставленні сильних і слабких аспектів компанії з потенційними сприятливими можливостями та ризиками для її діяльності. Метою такого порівняльного підходу є досягнення позитивної синергії (поєднання сильних сторін із сприятливими умовами) та подолання негативного ефекту (коли слабкі сторони взаємодіють із зовнішніми загрозами) [3]. На основі аналізу даних, сформуємо перелік факторів, які характеризують стан стартапу в контексті його конкурентоспроможності на ринку і представимо їх у таблиці 4.12.

На основі SWOT-аналізу бачимо, що стартап має сильні конкурентні переваги, такі як інноваційність та висока якість продукту. Проте він також стикається з низкою викликів, включаючи потребу в значних інвестиціях та ризик конкурентного тиску з боку міжнародних гравців. Використання наявних можливостей, таких як розширення ринку та підвищення попиту на цифрові технології, може допомогти ефективно компенсувати слабкі сторони проекту і посилити його ринкові позиції.

Таблиця 4.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. Вартість 2. Простота впровадження 3. Наявність технічної підтримки	Слабкі сторони: 1. Недосвідченість команди; 2. Відсутність знань з пошуку клієнтів; 3. Обмежений бюджет;
Можливості: 1. Масштабованість 2. Використання у інших сферах 3. Інтеграція з існуючими системами 4. Утворення бібліотеки програмних рішень	Загрози: 1. Конкуренція з боку іноземних компаній 2. Ризик зниження попиту через регуляторні зміни 3. Потенційна поява нових

	конкурентів
--	-------------

Спираючись на результати SWOT-аналізу, створимо можливі варіанти ринкових стратегій для запуску стартап-проєкту та проведемо оцінку обраних стратегій з урахуванням строків реалізації та ймовірності залучення необхідних ресурсів, які представимо у таблиці 4.13.

Таблиця 4.13 – SWOT- аналіз стартап-проєкту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Середня	12 місяців
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	8 місяців
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	6 місяців

З зазначених альтернатив обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями як найбільш перспективну, оскільки вона дозволяє максимально ефективно використовувати потенціал проєкту в умовах обраного ринку.

4.4 Розроблення ринкової стратегії стартап-проєкту

Першим кроком у розробленні ринкової стратегії є визначення цільових груп потенційних споживачів. Це дозволяє розробити найбільш ефективні стратегії охоплення ринку та створення ціннісних пропозицій, що відповідають специфічним потребам кожної групи. Вибір цільових груп потенційних споживачів представлено в таблиці 4.14.

На основі аналізу обрано цільову групу «промислові компанії», що забезпечує широкий ринок збуту та відповідає конкурентним перевагам стартапу. Цільові групи були обрані з урахуванням високого попиту на продукт, готовності споживачів до впровадження інновацій та можливостей конкурентної переваги на ринку. Таким чином, стартап зосередиться на

промисловому сегменті, де є найкращі можливості для розвитку та отримання вигоди.

Таблиця 4.14– Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Промислові виробництва	Висока	Високий	Середня	Висока
2	Логістичні компанії	Середня	Середній	Низька	Середня
3	Дослідницькі установи	Низька	Низький	Висока	Низька
Які цільові групи обрано: промислові виробництва Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення що компанія буде працювати із промисловими виробництвами.					

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно розробити базову стратегію розвитку, яка буде спрямована на ефективне охоплення цільової аудиторії та зміцнення конкурентних позицій стартапу (таблиця 4.15).

Таблиця 4.15– Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Диференційований маркетинг	Якісний продукт, підтримка клієнтів, постійний зворотній зв'язок	Стратегія диференціації

Таблиці 4.14 та 4.15 демонструють, що основною стратегією стартапу є диференціація, яка підкріплюється високою якістю продукту та активною підтримкою клієнтів. Ця стратегія дозволяє стартапу ефективно задовольняти потреби обраної цільової групи та зберігати конкурентоспроможність за рахунок інновацій. Вибір стратегії

диференційованого маркетингу забезпечить високий рівень задоволеності клієнтів та сприятиме утриманню їхньої лояльності до продукту, що в свою чергу зміцнить позиції стартапу на ринку.

Наступним кроком у розробці ринкової стратегії є визначення стратегії конкурентної поведінки, яка базується на аналізі позиції стартапу щодо його конкурентів та ринкової ситуації. У таблиці 4.16 представлено базова стратегія конкурентної поведінки стартапу.

Таблиця 4.16– Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
Так	Пошук нових споживачів	Ні, передбачено вдосконалення власних характеристик	Інноваційне проникнення на ринок

Видно, що обрана стратегія конкурентної поведінки передбачає інноваційне проникнення на ринок як "першопрохідця", з акцентом на пошук нових споживачів без наслідування характеристик товарів конкурентів. Такий підхід дає змогу стартапу закріпитися на ринку за рахунок унікальності та інновацій, що підвищить його привабливість для цільової аудиторії.

На основі вимог споживачів до постачальника і продукту з обраного сегменту, а також у відповідності до стратегій розвитку і конкурентної поведінки, розробимо стратегію позиціонування (таблиця 4.17). Вона визначає ринкову позицію, яку стартап займатиме в очах споживачів.

Проаналізувавши вимоги цільової аудиторії та сформувавши стратегію позиціонування, було визначено, що основними асоціаціями для даного стартапу є якість, зворотний зв'язок із клієнтами та постійна технічна підтримка.

Таблиця 4.17– Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)
Вдосконалення продукту, враховуючи побажання споживачів	Стратегія диференціації	Висока якість продукту, лояльність клієнтів, підтримка вхідних бар'єрів	Якість Зворотній зв'язок Технічна підтримка

Таке позиціонування дозволяє проєкту відповідати очікуванням споживачів, створюючи довіру та забезпечуючи лояльність цільової аудиторії. У сукупності ці чинники закріплюють конкурентні переваги стартап-проєкту на ринку, сприяючи довгостроковому розвитку та розширенню клієнтської бази.

4.5 Розроблення маркетингової програми та бізнес моделі стартап-проєкту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є створення маркетингової концепції товару, яка підкреслює вигоди, важливі для споживача, та конкурентні переваги, що роблять продукт привабливішим у порівнянні з аналогами на ринку. У таблиці 4.18 проілюстровано основні потреби потенційних споживачів та встановлено, яку саме вигоду пропонує продукт.

Ключові переваги концепції потенційного товару демонструють, що основні потреби споживачів зосереджені навколо вартості, простоти експлуатації та швидкості отримання результатів. Завдяки забезпеченню цих характеристик, стартап-проєкт «Цифровий двійник складального виробництва» здатен відповідати очікуванням клієнтів і забезпечувати довготривалу цінність для них. Крім того, конкурентні переваги, такі як висока точність і технічна підтримка, створюють додаткову вартість, яка приваблює споживачів та підвищує конкурентоспроможність на ринку.

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Вартість	Низька вартість	Збільшення кількості клієнтів
2	Простота експлуатації	Зручний і зрозумілий інтерфейс	Інтуїтивність використання, простота у налаштуванні
3	Швидкість отримання результатів	Швидка обробка даних і видача результатів	Мінімізація часу очікування результатів

Наступним кроком є розробка 3-рівневої маркетингової моделі товару, яка допоможе визначити всі складові, що формують сприйняття продукту на ринку. У цій моделі кожен рівень має свої особливості: починаючи від задуму і характеристик товару до елементів підтримки клієнта. У таблиці 4.19 представлені три рівні товару та їх складові.

Трирівнева модель товару демонструє прагнення забезпечити високу конкурентоспроможність продукту завдяки його ключовим характеристикам, зокрема точності вимірювань, надійності та якості, які є визначальними для потенційного клієнта. Обслуговування товару після продажу забезпечує додаткову цінність для клієнтів, що сприяє формуванню довготривалих відносин із споживачами.

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Цифровий двійник виробничого процесу складання		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Візуалізація процесу виробництва	М	Тх
	2. Якість	Нм	Тх
	3. Вартість	М	Е
	4. Довговічність (немає строку давності)	Нм	Вр

	5. Надійність	М	Тл
	Якість: відповідає нормам українського законодавства		
	Пакування: ПЗ встановлюється на комп'ютер або планшет		
	Марка: «ЦД-ВП»		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: консультації щодо вибору, ознайомлення з інструкцією		
	Після продажу: технічна підтримка		

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар. Це передбачає детальний аналіз цін на товари-замінники та товари-аналоги, а також оцінку рівня доходів цільової аудиторії. Визначення меж встановлення ціни представлено у таблиці 4.20.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
Високий	Високий	Середній	45-50 тис.грн.

Визначення меж для ціни товару з урахуванням рівня доходів цільової групи та аналізу цін на товари-замінники і товари-аналоги показав, що оптимальна ціна для розробленого продукту повинна бути в діапазоні 7-10 тис.грн. Це дозволить зробити продукт конкурентоспроможним, враховуючи потреби споживачів та особливості ринку. Важливою умовою є забезпечення відповідності ціни рівню доходів цільової групи для максимального залучення споживачів.

Далі формується система збуту, яка враховує специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів, а також необхідні функції, які має виконувати постачальник товару (таблиця 4.21).

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
---	---	----------------------	--------------------------

Прямі закупівлі у великому обсязі	Логістика, технічна підтримка	Канал нульового рівня	Прямий збут з технічною підтримкою
-----------------------------------	-------------------------------	-----------------------	------------------------------------

Розроблена система збуту дозволяє адаптуватися до потреб цільових клієнтів. Вибір оптимальної глибини каналу та функцій збуту, таких як технічна підтримка і логістика забезпечує високу ефективність продажу товару, а для прямих закупівель у великому обсязі передбачено прямий збут, що оптимізує процеси і знижує витрати.

Також важливою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, яка спирається на попередньо визначену специфіку поведінки клієнтів. Це допоможе вибудувати ефективну стратегію комунікацій, що дозволить донести цінність продукту до клієнтів. Концепція маркетингових комунікацій представлено у таблиці 4.22.

Результатом даного дослідження є розробка концепції маркетингових комунікацій, яка зосереджена на специфічних каналах взаємодії з цільовими клієнтами, таких як технічні форуми та професійні виставки. Основним завданням рекламного повідомлення є підвищення обізнаності споживачів щодо високої точності та надійності розробленого продукту, який реалізується за допомогою створення цифрових двійників виробничих процесів. Створене рекламне звернення фокусується на інноваційних характеристиках продукту та його перевагах для промислових компаній.

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Зацікавленість	Професійні	Автоматизація, ціна,	Ознайомити з	Інноваційний

ь в інноваціях, шукають ефективність і точність	виставки, онлайн-ресурси, технічні форуми	якість	перевагами цифрових двійників процесів виробництва	підхід до виготовлення виробів
---	---	--------	--	--------------------------------

Останнім етапом є створення бізнес-моделі. Бізнес-модель є «скелетом» компанії. Вона визначає та структурує всі внутрішні процеси, які спрямовані на підтримку та розвиток [1]. Бізнес-модель стартап-проєкту «Цифровий двійник виробничого процесу складання» полягає у створенні, наданні та підтримці програмного продукту, який дозволяє проводити моніторинг процесів виробництва в режимі реального часу, проводити попереднє моделювання та симуляцію процесу (таблиця 4.23).

Стартап-проєкт «Цифровий двійник виробничого процесу складання» передбачає співпрацю з розробниками програмного забезпечення для моделювання та симуляції процесів виробництва.

Отже, дана бізнес-модель є чітко структурована система створення, доставки та підтримки цінності продукту для клієнтів. Завдяки співпраці з ключовими партнерами, прямим каналам збуту та потужній технічній підтримці, стартап забезпечує високу якість і надійність «Цифровий двійник виробничого процесу складання», що дозволяє не тільки задовольняти поточні потреби ринку, а й розвивати стійкі відносини з клієнтами, що сприяє зростанню доходів і довгостроковому успіху стартап-проєкту.

Таблиця 4.23 – Бізнес-модель

Ключові партнери Постачальники програмного забезпечення	Ключові види діяльності Виробництво обладнання, інтеграція та налаштування обладнання, розробка програмного забезпечення	Ціннісна пропозиція Моніторинг процесів виробництва в режимі реального часу, моделювання та симуляція процесу	Відносини з клієнтами Технічна підтримка, інструктаж та навчання, постійна комунікація	Сегменти користувачів Промислові підприємства різних галузей
---	--	---	--	--

	Ключові ресурси програмне забезпечення, навчальний матеріал	виробництва, масштабування на інші виробничі процеси	Канали збуту Прямі продажі, дистриб'юторські мережі, інтернет-продажі, виставки та галузеві заходи	
Структура витрат Виробничі витрати, витрати на обслуговування клієнтів, маркетингові витрати		Джерела доходів Продаж обладнання, технічне обслуговування, платне навчання та консалтинг		

Висновки до розділу 4

Проведений аналіз стартап проекту «Цифровий двійник виробничого процесу складання» можна зробити висновок, що ринкова комерціалізація проекту опирається на наявний попит, та рентабельність продукту на ринку. При розробці стартап-проекту були враховані потенційні групи користувачів та клієнтів, перспектива впровадження проекту Це не просто система для аналізу використання ресурсів , які вже представлені на ринку, а ціла автоматизована система. Продукт відразу націлений на внутрішній ринок, але з можливістю виходу на міжнародний ринок. Також передбачений захист «Цифровий двійник виробничого процесу складання» свідоцтвами авторського права на твір.

Проведений аналіз дозволив виявити ключові переваги продукту, що вирізняють його серед існуючих аналогів, а також окреслити можливі виклики на етапі впровадження.

Було проведено аналіз конкурентів та обрано стратегію ринкової поведінки, що дозволило сформувавши надійну маркетингову програму для просування продукту. Використання унікальних характеристик, зокрема точності. якості і довговічності приладу, надає перевагу на ринку, а маркетингова програма орієнтована на формування лояльності споживачів через підвищення обізнаності про якість та ефективність продукту. Визначено оптимальні канали збуту та структуру витрат, що сприяє розумінню фінансових та логістичних аспектів впровадження стартапу.

Результати аналізу свідчать про перспективність стартап- проекту «Цифровий двійник виробничого процесу складання». Існуючий попит на подібний продукт серед промислових підприємств, вказує на потенціал його рентабельності та доцільність подальшої реалізації. Високий рівень конкурентоспроможності дозволяє проекту мати стабільні перспективи зростання, а його технологічні та ринкові переваги роблять подальше впровадження стартап-проекту доцільним і успішним.

ВИСНОВОК

Магістерська дисертація присвячена розробці архітектури та компонентів цифрового двійника для виробничого процесу складання, що є актуальним і важливим завданням в умовах розвитку концепції Індустрії 4.0. Проведене дослідження дозволило комплексно розглянути ключові аспекти впровадження цифрових двійників у складальне виробництво, зокрема їх концептуальні основи, архітектурні підходи, імітаційне моделювання та практичну цінність.

Цифрові двійники є основою цифрової трансформації промисловості, дозволяючи підвищити ефективність і продуктивність виробничих процесів. У роботі обґрунтовано, що впровадження цифрових двійників є необхідністю для сучасних підприємств, оскільки вони:

- забезпечують дистанційний моніторинг і управління у реальному часі;
- дозволяють оптимізувати процеси і мінімізувати витрати;
- сприяють підвищенню якості продукції та зниженню кількості дефектів;
- дозволяють адаптувати виробничі процеси до змінних умов ринку.

У ході дослідження були отримані наступні наукові результати:

- Запропоновано моделі цифрових двійників об'єктів складання та виробничого процесу, які дозволяють створювати віртуальні копії реальних об'єктів із високою точністю.
- Розроблено архітектуру цифрового двійника складального виробництва, що складається з фізичного, інформаційного, кібернетичного рівнів та рівня взаємодії з користувачем.
- Створено імітаційну модель складального процесу, яка дозволяє проводити моделювання і тестування різних сценаріїв виробництва, прогнозувати можливі збої та оптимізувати ресурси.

- Визначено вимоги до цифрового двійника, включаючи підтримку реального часу, гнучкість, інтеграцію з іншими системами та здатність до передиктивного обслуговування.

Практична цінність дисертації полягає у розробці цифрового двійника виробничого процесу складання, який дозволяє:

- в реальному часі відстежувати стан обладнання та параметри процесу;
- оперативно реагувати на зміну умов і прогнозувати можливі відмови;
- здійснювати передиктивне технічне обслуговування, що знижує час простоїв;
- покращувати координацію між різними етапами виробництва і забезпечувати ефективний обмін даними між фізичними і цифровими системами.

Основні результати дослідження були представлені на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях, а також опубліковані в наукових журналах. Це підтверджує наукову новизну і практичну цінність роботи, а також її відповідність сучасним тенденціям у сфері цифрових технологій.

Отримані результати відкривають нові напрями для подальших досліджень, зокрема:

- розширення функціоналу цифрового двійника шляхом інтеграції інтелектуальних алгоритмів аналізу даних і машинного навчання;
- дослідження можливостей використання цифрових двійників для автоматизованого прийняття рішень і адаптивного управління виробничими процесами;
- розробка універсальних стандартів для створення і інтеграції цифрових двійників у різних галузях промисловості.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило актуальність і значущість використання цифрових двійників у складальному виробництві. Запропоновані моделі, архітектура і методи створення цифрових двійників

мають як наукову, так і практичну цінність, забезпечуючи основу для подальшої цифрової трансформації виробничих підприємств і підвищення їхньої конкурентоспроможності в умовах сучасних викликів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication / M. Grieves // White paper. – 2014. – № 1. – Pp. 1-7.
2. Digital Twins. <https://www.it.ua/>. URL: <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoj-dvojnuk-digital-twin> (дата звернення: 19.06.2024).
3. Attaran, M.; Celik, B.G. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decis. Anal. J.* 2023, 6, 100165
4. van der Valk, H., Haße, H., Möller, F. et al. Archetypes of Digital Twins. *Bus Inf Syst Eng* 64, 375–391 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12599-021-00727-7>
5. Ding, H.; Zhao, L.; Yan, J.; Feng, H.-Y. Implementation of Digital Twin in Actual Production: Intelligent Assembly Paradigm for Large-Scale Industrial Equipment. *Machines* 2023, 11, 1031.
6. Ding, H.; Zhao, L.; Yan, J.; Feng, H.-Y. Implementation of Digital Twin in Actual Production: Intelligent Assembly Paradigm for Large-Scale Industrial Equipment. *Machines* **2023**, *11*, 1031. <https://doi.org/10.3390/machines11111031>
7. Bao Q, Zhao G, Yu Y, Dai S, Wang W. Ontology-based modeling of part digital twin oriented to assembly. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2022;236(1-2):16-28. doi:10.1177/0954405420941160
8. DIN SPEC 91345:2016-04 (E) Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) Publication date 2016-04 (DOI:10.31030/2436156)
9. Yan J. et al. Point cloud data fitting-based reverse engineering technique for digital model updating of assembly structure //2021 7th International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science (ICMEAS). – IEEE, 2021. – C. 172-177.

10. Чибіряк Я., Баранова І., Ніколаєнко К. Метод наскрізного навчання студентів ІТ-спеціальностей імітаційному моделюванню у середовищі FlexSim для пошуку резервів підвищення ефективності автоматизованих систем. // Comput. Technol. Educ. Sci. Prod. 2021. № 42. Р. 119–129
11. Beaverstock, Malcolm Greenwood, A., & Nordgren, W. (2017). Applied Simulation: Modeling and Analysis Using Flexsim. FlexSim Software Products. <https://www.amazon.com/Applied-Simulation-Modeling-AnalysisFlexsim/dp/0983231974>
12. J. Leng, D. Wang, et al. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: a review J. Manuf. Syst., 60 (2021), pp. 119-137, [10.1016/j.jmsy.2021.05.011](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011)
13. J. Leng, M. Zhou, et al. Digital twins-based remote semi-physical commissioning of flow-type smart manufacturing systems J. Clean. Prod., 306 (2021), [10.1016/j.jclepro.2021.127278](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127278)
14. Nicolò Saporiti, Violetta Giada Cannas, Rossella Pozzi, Tommaso Rossi, Challenges and countermeasures for digital twin implementation in manufacturing plants: A Delphi study, International Journal of Production Economics, Volume 261, 2023, 108888, ISSN 0925-5273, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108888>.
15. E.K.H. Leung, C.K.H. Lee, Z. Ouyang From traditional warehouses to Physical Internet hubs: a digital twin-based inbound synchronization framework for PI-order management Int. J. Prod. Econ., 244 (2022), [10.1016/j.ijpe.2021.108353](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108353)
16. J. Leng, Q. Liu, et al. Digital twin-driven rapid reconfiguration of the automated manufacturing system via an open architecture model Robot. Comput. Integrated Manuf., 63 (2020), [10.1016/j.rcim.2019.101895](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101895)
17. Jiang, Haifan & Qin, Shengfeng & Fu, Jianlin & Zhang, Jian & Ding, Guofu. (2020). How to model and implement connections between physical

- and virtual models for digital twin application. *Journal of Manufacturing Systems*. 58. 10.1016/j.jmsy.2020.05.012.
18. Dr. Naoufel Boulila "Guidelines for Modeling Cyber-Physical Systems – A Three-Layered Architecture for Cyber-Physical Systems" // Siemens Corporate Technology
 19. Shao G. et al. Use case scenarios for digital twin implementation based on iso 23247 //National Institute of Standards: Gaithersburg, MD, USA. – 2021
Zheng, P., & Sivabalan, A. S. (2020). A generic tri-model-based approach for product-level digital twin development in a smart manufacturing environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 64, 101958
 20. F Tao, M Zhang, AYC Nee, *Digital twin driven smart manufacturing*, Academic Press, 2019
 21. Miruna Iliuță, Eugen Pop, Simona Iuliana Caramihai & Mihnea Alexandru Moisescu A Digital Twin Generic Architecture for Data-Driven Cyber-Physical Production Systems [Текст] / Miruna Iliuță, Eugen Pop, Simona Iuliana Caramihai & Mihnea Alexandru Moisescu — 2023
 - A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow Digital twin: enabling technologies, challenges and open research *IEEE Access*, 8 (2020), pp. 108952-108971, 10.1109/ACCESS.2020.2998358
 22. Matteo Perno, Lars Hvam, Anders Haug, Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers, *Computers in Industry*, Volume 134, 2022, 103558, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558>.
 23. Ming Li, Zhi Li, Xidian Huang, Ting Qu, Blockchain-based digital twin sharing platform for reconfigurable socialized manufacturing resource integration, *International Journal of Production Economics*, Volume 240, 2021, 108223, ISSN 0925-5273, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108223>.
 24. Zhang, Z., Guan, Z., Gong, Y., Luo, D., & Yue, L. (2020). Improved multi-fidelity simulation-based optimisation: application in a digital twin shop

- floor. *International Journal of Production Research*, 60(3), 1016–1035.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1849846>.
25. Zhou, G., Zhang, C., Li, Z., Ding, K., & Wang, C. (2019). Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(4), 1034–1051. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1607978>
 26. Цифрове підприємство для безперервного виробництва. URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/kompaniya/klyuchovi-temy/tsifrovaya-promyshlennost/bezperervne-vyrobnytstvo.html> (дата звернення: 27.09.2024).
 27. CADMATIC eShare™ - digital twin software for process industry. URL: <https://www.cadmatic.com/en/products/cadmatic-eshare/eshare-for-process-and-industry/> (дата звернення: 27.08.2024)
 28. ANSYS TWIN BUILDER. URL: <https://www.ansys.com/products/digital-twin/ansys-twin-builder> (дата звернення: 27.09.2024).
 29. ExtendSim. URL: <https://extendsim.com/> (дата звернення: 25.09.2024).
 30. 3D Simulation Modeling and Analysis Software. URL: <https://www.flexsim.com/> (дата звернення: 28.09.2024).
 31. Гавриш, О. А., Бояринова К. О., Копішинська К. О. Розробка стартап-проектів. Конспект лекцій: навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні (1 файл: 2,88 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 188 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/29447>
 32. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для

- студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
33. Покропивний С. Ф., Соболев С. М., Швиданенко Г. О., Дерев'янка О. Г. Бізнес-план: технологія розробки та обґрунтування: навчальний посібник. Київ: КНЕУ, 2002. 379 с.
 34. Філіппова, М.В. Використання цифрового двійника для складального виробництва / М.В. Філіппова, М.О. Демченко, О.В. Філіппов, С.С. Заєць // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2024.- № 335 (3(1)). – С. 202-208. DOI: <https://doi.org/10.31891//2307-5732-2024-335-3-28>
 35. Barbieri, G.; Bertuzzi, A.; Capriotti, A.; Ragazzini, L.; Gutierrez, D.; Negri, E.; Fumagalli, L. (2021). A virtual commissioning based methodology to integrate digital twins into manufacturing systems. *Prod. Eng. Res. Dev*, 15, 397–412. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01037-3>
 36. Вислоух С.П. Інформаційні основи проектування технології механоскладальних робіт в приладобудуванні / С.П. Вислоух, М.В. Філіппова // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. – 2004. – № 28. – С.139-144.
 37. Проскурєнко Д.М. Автоматизоване планування послідовності складання / Д.М. Проскурєнко, О.В. Третьак, М.О. Демченко, М.В. Філіппова // Енергетика і автоматика. - 2021. - №5. - С. 28-44 р. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.05.028>
 38. Liu C, Vengayil H, Lu Y, Xu X. A cyber-physical machine tools platform using OPC UA and MTConnect. *Int J Ind Manuf Syst Eng* 2019;51:61–74. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.04.006>
 39. Ruiz N, Giret A, Botti V, Fera V. An intelligent simulation environment for manufacturing systems. *Comput Ind Eng* 2014;76:148–68. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.06.013>

40. Min Q, Lu Y, Liu Z, Su C, Wang B. Machine learning based digital twin framework for production optimization in petrochemical industry. *Int J Inf Manage* 2019;49:502–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.020>
41. Shah, G.; Polette, A.; Pernot, J. Simulated annealing-based fitting of CAD models to point clouds of mechanical parts' assemblies. *Eng. Comput.* **2021**, 37, 2891–2909.
42. Gupta, Sunil & Iyer, Ravi & Kumar, Sanjeev. (2024). Digital Twin: Theory and Concepts. 10.1007/978-3-031-76564-3_1.
43. Hananto, April & Tirta, Andy & Herawan, Safarudin & Idris, Muhammad & Soudagar, Manzoore Elahi & Djamari, Djati Wibowo & Veza, Ibham. (2024). Digital Twin and 3D Digital Twin: Concepts, Applications, and Challenges in Industry 4.0 for Digital Twin. *Computers*. 13. 100. 10.3390/computers13040100.
44. Щеглов В. Р., Морозова О. І.. Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустриального інтернету речей. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 4. 127-137. 10.26906/SUNZ.2022.4.127.
45. Сулема, Є., & Рвач, Д. (2023). Формальна специфікація цифрового двійника мультимедійного об'єкта на основі кількісних відношень дискретних інтервалів. *Computer Systems and Information Technologies*, (4), 60–66. <https://doi.org/10.31891/csit-2023-4-8>