

Херсонський національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерії та транспорту

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Автоматизації, робототехніки і мехатроніки

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему: «Дослідження інтелектуальних технологій та проєкт
смартпідприємства по виробництву сільгосптехніки»

Пояснювальна записка

Виконав: студент 2 курсу, групи БПМ
Спеціальності 131-Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

Островський Б.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник Дмитрієв Д.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Русанов С.А.

(прізвище та ініціали)

Херсон - Хмельницький – 2025

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк. А
Ізм..I	Арк. А	№ докум. №	Підпис ПІ	Дата		1

Херсонський національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

- Інститут, факультет, відділення інженерії та транспорту
- Кафедра, циклова комісія Автоматизації, робототехніки і мехатроніки
- Освітньо-кваліфікаційний рівень магістра
- Напрямок підготовки _____
- Спеціальність 131- Прикладна механіка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, голова циклової
комісії _____

Селіверстов І.А.

«05» вересні 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Островський Богдан Ігорович

1. Тема проекту «Дослідження інтелектуальних технологій та проект смартпідприємства по виробництву сільгосптехніки».

Керівник проекту (роботи) Дмитрієв Дмитро Олексійович

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

Затвердженні наказом вищого навчального закладу від 28.08.2025 року № 363-

с.

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.12.2025

3. Вихідні дані по проекту (роботи) Структура Проєкт смартфабрики та дослідження інтелектуальних технологій серійного виготовлення деревообробної продукції підприємства, номенклатура продукції, що виробляється, типовий технологічний процес, опис обладнання, контрольно-вимірювальних засоби, система комп'ютеризації та диспетчеризації підприємства.

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм..І	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		2

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Сучасний стан виробництва, аналіз наукових публікацій, визначення мети.

2. Математична, імітаційна модель цифрового двійника підприємства або технічного об'єкта

3. Опис смарт системи підприємства, технічні характеристики, ключові показники ефективності.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Аналіз сучасного стану по темі роботи	Дмитрієв Д.О.	05.09.25	05.09.25
Опис кібер фізичних засобів виробництва	Дмитрієв Д.О.	19.09.25	19.09.25
Інформаційне забезпечення технології, моделі цифрових двійників технологічних і механічних систем	Дмитрієв Д.О.	07.10.25	07.10.25
Ключові показники ефективності спроектованого виробництва	Дмитрієв Д.О.	21.10.25	21.10.25
Концепція стартапу			

«AgroTwin» та вирішувані проблеми	Дмитрієв Д.О.	28.10.25	28.10.25
---	---------------	----------	----------

Дата видачі завдання 05.09.25

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм..I	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		4

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної Роботи	Срок виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір і огляд літератури	9.09.25	
2	Методи досліджень, математичні моделі, апаратне забезпечення	17.09.25	
3	Проектування елементів Смартсистема виробництва, структура та опис цифрових двійників технологічних процесів	30.09.25	
4	Розділ про ключові показники ефективності спроектованого смартпідприємства	15.10.25	
5	Розділ про перспективи створення стартапу на основі проекту цифрового двійника підприємства	28.10.25	
6	Оформлення ПЗ і плакатів	14.11.25	
7	Завершення оформлення проекту	25.11.25	

Студент _____ Островський Б.І.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Дмитрієв Д.О.

(підпис) (прізвище та ініціали)

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм..І	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		5

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційну магістерську роботу присвячено розробці проєкту цифрового двійника смартпідприємства з виготовлення та ремонту деталей і агрегатів для сільськогосподарської техніки. У роботі проаналізовано сучасний стан машинобудівного виробництва сільгосптехніки та застосування інтелектуальних технологій, кібер-фізичних систем і сенсорних платформ для оптимізації виробничих процесів.

Розглянуто інтеграцію автоматизованих систем переробки металевих відходів, моделювання виробничих операцій у програмних середовищах, контроль стану обладнання та якості деталей. Розроблено модель цифрового двійника підприємства, що забезпечує інформаційне управління життєвим циклом виробів, прогнозування стану обладнання та підвищення ефективності виробничих процесів.

Пояснювальна записка магістерської роботи складається з вступу, 5 розділів, висновків та додатків. Містить 84 сторінку тексту, 40 рисунків, 8 таблиць та 36 використаних джерел інформації.

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм..І	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		6

ABSTRACT

The master's thesis is dedicated to the development of a digital twin project for a smart enterprise involved in the manufacturing and repair of parts and assemblies for agricultural machinery. The study analyzes the current state of agricultural machinery production and the application of intelligent technologies, cyber-physical systems, and sensor platforms to optimize production processes.

The work considers the integration of automated metal waste recycling systems, simulation of manufacturing operations using software platforms, equipment condition monitoring, and quality control of parts. A digital twin model of the enterprise is developed, providing information management of the product lifecycle, equipment condition forecasting, and improvement of production process efficiency.

The explanatory note of the master's thesis consists of an introduction, 5 chapters, conclusions, and appendices. It includes 84 pages of text, 40 figures, 8 tables, and 36 references.

					<i>ХНТУ 131-01-2025 ПЗ</i>	Арк.А
Ізм..І	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		7

ЗМІСТ

Вступ	12
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВІ СІЛЬГОСПТЕХНІКИ	15
1.1. Аналітичний огляд наукових джерел щодо застосування інтелектуальних технологій у промисловості	15
1.2. Оцінка сучасного стану підприємства з виробництва сільгосптехніки в умовах цифровізації	17
РОЗДІЛ 2. КІБЕР-ФІЗИЧНІ СИСТЕМИ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ МАШИНОБУДУВАННІ	30
2.1. Симуляція виробничих процесів за допомогою сучасних програмних платформ.....	30
2.2. Інтеграція сенсорних систем для контролю стану обладнання та деталей	36
2.3 Інтеграція автоматизованої системи переробки металевих відходів металообробного підприємства з виготовлення сільськогосподарської техніки.....	42
2.4. Кібер-фізичні методи контролю якості та діагностики вузлів і агрегатів	44
РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ. РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА СМАРТПІДПРИЄМСТВА	48
3.1. Використання цифрових платформ і програмних рішень у машинобудуванні.....	48
3.2. Інформаційне забезпечення життєвого циклу виробів сільгосптехніки	51
3.3. Модель цифрового двійника смартпідприємства по виробництву сільгосптехніки	54
РОЗДІЛ 4. КЛЮЧОВІ ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СПРОЕКТОВАНОГО СМАРТПІДПРИЄМСТВА	61
4.1. Аналіз завантаженості обладнання у виробництві деталей та агрегатів	61
4.2. Порівняльний аналіз ключових показників ефективності традиційного та смартвиробництва	62
РОЗДІЛ 5. ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ СТАРТАПУ НА ОСНОВІ ПРОЕКТУ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ПІДПРИЄМСТВА.....	67
5.1. Концепція стартапу «AgroTwin» та вирішувані проблеми.....	67
5.2. Технологічна реалізація та бізнес-модель.....	69

5.3. Етапи реалізації та очікувані результати.....	74
Висновки.....	79
Список використаних джерел	81
Додатки.....	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

KPI / КПЕ – Key Performance Indicators / Ключові показники ефективності – показники, що відображають ефективність виробничих процесів або підприємства.

OEE – Overall Equipment Effectiveness – коефіцієнт загальної ефективності обладнання; враховує доступність, продуктивність та якість.

MWF – Metal Working Fluids – рідини для металообробки: масла, охолоджувальні рідини, які використовуються для зменшення тертя та тепловиділення.

PPE / ЗІЗ – Personal Protective Equipment / Засоби індивідуального захисту – захисні засоби для працівників (рукавички, окуляри, комбінезони, взуття тощо).

CAD – Computer-Aided Design – САПР, системи автоматизованого проектування деталей і вузлів.

CAE – Computer-Aided Engineering – САПР-аналітика, комп'ютерне моделювання процесів, міцності та інших параметрів.

CPS – Cyber-Physical System – кібер-фізична система, інтеграція комп'ютерних систем і фізичного виробничого процесу.

AgroTwin – назва стартапу та платформи цифрового двійника для сільгосптехніки.

Цифровий двійник (Digital Twin) – віртуальна модель підприємства або виробничого процесу, що відображає реальний стан обладнання, деталей та потоків виробництва для аналізу та оптимізації.

Смартвиробництво (Smart Manufacturing) – використання цифрових технологій, сенсорів, робототехніки та програмних платформ для підвищення ефективності та гнучкості виробництва.

Кібер-фізичні методи контролю – методи контролю якості та діагностики деталей та вузлів за допомогою сенсорів і комп'ютерних систем.

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм..I	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		10

Імітаційне моделювання – комп’ютерне моделювання виробничих процесів для прогнозування ефективності, часу обробки та навантаження на обладнання.

Металообробний цех – виробничий підрозділ підприємства, де виконуються токарні, фрезерні, шліфувальні та інші операції обробки металевих деталей.

Переробка металевих відходів – процес утилізації та повторного використання металу з виробничих відходів для економії матеріалів і зменшення забруднення.

Робоче місце оператора – зона виробництва, де працівник здійснює обслуговування верстата або виконання технологічних операцій.

Пуско-налагоджувальні роботи – операції, пов’язані з запуском або налаштуванням обладнання перед серійним виробництвом.

Енергоспоживання на одиницю продукції – показник витрат електроенергії на виготовлення однієї деталі чи агрегату.

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм..І	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		11

Вступ

Сучасний етап розвитку промисловості характеризується стрімким упровадженням інтелектуальних технологій, цифрових систем управління та принципів Індустрії 4.0. Традиційні виробничі процеси поступово трансформуються у високотехнологічні комплекси, де поєднуються роботизація, автоматизація, інтернет речей, цифрові двійники, системи штучного інтелекту та кіберфізичні системи. Такі зміни зумовлені необхідністю забезпечення конкурентоспроможності підприємств, підвищення якості продукції, скорочення виробничих витрат і формування гнучких виробничих систем, здатних оперативно адаптуватися до потреб ринку.

Особливого значення цифрова трансформація набуває у сфері виробництва сільськогосподарської техніки. Сільське господарство є однією з ключових галузей економіки України, яка потребує постійного оновлення технічної бази для підвищення ефективності аграрного виробництва. Сучасні комбайни, трактори, жатки та інші види сільгосптехніки є складними технічними системами, що вимагають високого рівня точності виготовлення їхніх вузлів і агрегатів. Це зумовлює необхідність використання передових технологій моделювання, автоматизованих систем управління виробництвом та впровадження смартпідприємств, побудованих на основі інтелектуальних рішень.

Створення смартпідприємства у сфері машинобудування для аграрного сектору передбачає інтеграцію кіберфізичних систем, сенсорних технологій, роботизованих комплексів і цифрових двійників, які дозволяють забезпечити безперервний моніторинг обладнання, прогнозування його стану та оптимізацію виробничих процесів. Водночас упровадження таких систем сприяє зменшенню впливу людського фактору, скороченню витрат на обслуговування обладнання, підвищенню продуктивності праці та забезпеченню високої якості готової продукції.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю поєднання традиційних технологій машинобудування з сучасними цифровими рішеннями, що забезпечують комплексний підхід до управління виробництвом. Для

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм..І	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		12

що спеціалізуються на випуску сільгосптехніки, а також для створення нових виробничих комплексів, які відповідатимуть вимогам Індустрії 4.0 та забезпечуватимуть високу конкурентоспроможність на внутрішньому і міжнародному ринках.

Таким чином, робота спрямована на розробку науково обґрунтованих підходів і практичних рішень, що забезпечать ефективне функціонування смартпідприємства з виробництва сільськогосподарської техніки в умовах сучасних викликів цифрової економіки.

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк. А
Ізм../	Арк. А	№ докум. №	Підпис/Пі	Дата		14

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВІ СІЛЬГОСПТЕХНІКИ

1.1 Аналітичний огляд наукових джерел щодо смартизації підприємств з виробництва сільгосптехніки

Моделювання виробничих систем є одним із ключових інструментів сучасного інженерного аналізу та управління підприємствами. Воно передбачає використання спеціального програмного забезпечення для створення комп'ютерних моделей реальних виробничих процесів з метою їх вивчення, оптимізації та прогнозування ефективності. Для підприємств, що займаються виготовленням сільськогосподарської техніки, це особливо актуально, оскільки виробництво вузлів і агрегатів (шестерень, валів, жаток, корпусних деталей тощо) є складним і багаторівневим процесом, який потребує високої точності та надійності [8].

Моделювання дозволяє аналізувати вплив капітальних інвестицій у обладнання, логістичні та складські системи, а також прогнозувати ефективність як існуючих, так і запланованих виробничих потужностей. Використання цифрових моделей допомагає порівнювати альтернативні рішення, визначати оптимальні виробничі схеми та уникати помилок, які неможливо побачити під час роботи з реальними об'єктами.

Одним із ключових завдань моделювання є розуміння того, як зміни в окремих елементах системи (наприклад, у роботі верстата з ЧПК, у зміні маршруту транспортування деталей чи у графіку постачання сировини) впливають на весь виробничий процес у цілому. Традиційними методами оцінити це складно, тоді як цифрові симуляції надають можливість прогнозувати наслідки змін і приймати обґрунтовані рішення [12].

У процесі аналізу моделей можна отримати такі показники:

- кількість виготовлених деталей за одиницю часу;
- середній час обробки та транспортування деталей;
- тривалість перебування деталей у черзі на обробку;

- рівень використання обладнання та персоналу;
- рівень завантаженості виробничих ліній;
- обсяг виробничих запасів та інвентаризації;
- своєчасність виконання замовлень.

Розглянемо такі основні групи програмних засобів і технологій, що застосовуються у смартизації машинобудівних підприємств:

- **CAD/CAM-системи** – інструменти для створення 3D-моделей деталей та технологічних процесів, які спрощують розробку конструкцій і підготовку до виробництва [1; 2].
- **Системи візуалізації та аналізу даних** – дозволяють отримувати візуальні цифрові двійники виробництва, аналізувати потоки інформації та оптимізувати прийняття управлінських рішень [17].
- **Системи моделювання та симуляції** (Tecnomatix Plant Simulation, AnyLogic, Arena) – забезпечують можливість створення математичних моделей виробничих процесів для виявлення вузьких місць, оптимізації ресурсів і підвищення продуктивності [8; 12].
- **PLM-системи (Product Lifecycle Management)** – інтегровані рішення для управління життєвим циклом виробу, що дозволяють відстежувати кожен етап – від проектування деталі до її експлуатації та утилізації [4].
- **ERP-системи (Enterprise Resource Planning)** – забезпечують комплексне управління матеріальними та фінансовими потоками підприємства [16].
- **Навчальні платформи нового покоління для програмування логічних контролерів (Next-Gen PLC Training)** – дозволяють готувати кваліфікованих фахівців з автоматизації виробництва, забезпечуючи їм доступ до сучасного обладнання та симуляційних рішень [19; 20].

Отже, проведений огляд показує, що смартизація підприємств із виробництва сільгосптехніки неможлива без використання цифрового моделювання, кіберфізичних систем і комплексних програмних рішень. Саме поєднання цих інструментів дозволяє підвищити ефективність виробничих

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм..I	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		16

процесів, забезпечити конкурентоспроможність продукції та сформувати базу для створення повноцінного смартпідприємства (Рис. 1.1) [5; 9].

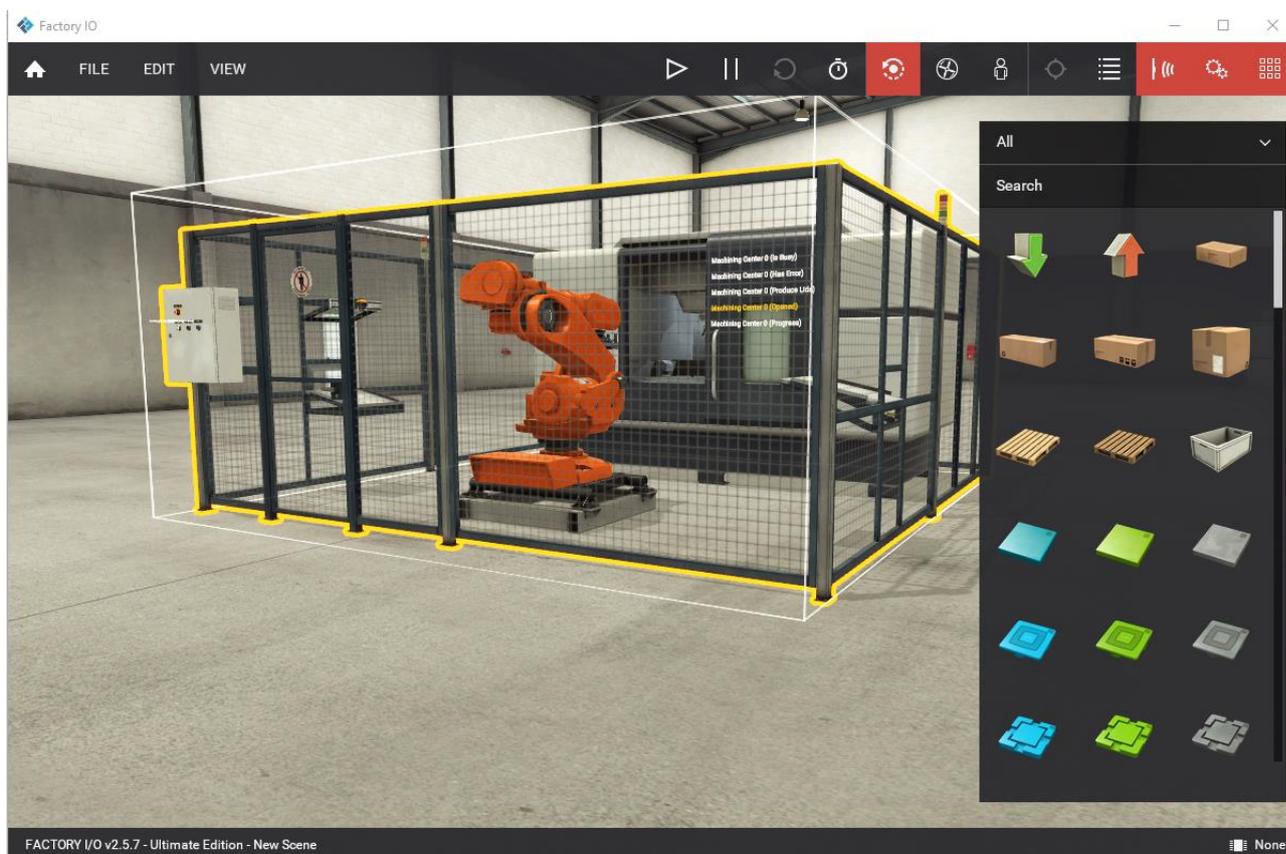


Рисунок 1.1. Зображення робочого вікна Next-Gen PLC Training

- Tecnomatix Plant Simulation (від Siemens) — це потужний інструмент для моделювання виробничих процесів, який дозволяє створювати детальні симуляції виробничих ліній і тестувати їх у віртуальному середовищі. Tecnomatix Plant Simulation дозволяє налаштовувати параметри всіх елементів виробничої системи, включаючи роботу обладнання, завантаження і час обробки деталей [8; 12].
- Системи IoT об'єднують пристрої та датчики, що збирають і передають дані в реальному часі. Це дозволяє здійснювати моніторинг виробничих процесів, підтримувати контроль якості та оптимізувати ресурсне планування [13; 15].

1.2 Оцінка сучасного стану підприємства з виробництва сільськогосподарської техніки в умовах цифровізації

Сучасний розвиток промисловості безпосередньо пов'язаний із тенденціями Індустрії 4.0, що передбачає впровадження цифрових технологій,

Ізм..I	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата

ХНТУ 131-01-2025 ПЗ

Арк.А

| 17

Таким чином, підприємство перебуває на етапі трансформації від традиційного виробництва до смартпідприємства, що відповідає концепції Індустрії 4.0. Подальший розвиток можливий шляхом:

- впровадити MES-системи для інтеграції виробничих процесів у єдиний інформаційний простір;
- застосувати ERP-рішення для координації управлінської, фінансової та логістичної діяльності;
- створити цифровий двійник виробництва, що дозволить моделювати різні сценарії та підвищити ефективність виробничих рішень;
- розвивати PLM-системи, які забезпечать комплексне управління життєвим циклом продукції – від проектування до утилізації.

Отже, сучасний стан підприємства можна охарактеризувати як такий, що має достатній потенціал для цифрової трансформації, але потребує модернізації обладнання, інтеграції інформаційних систем та впровадження інтелектуальних технологій (рис. 1.2).





в)



г)



д)



е)

Рисонок 1.2. а) токарно-гвинторізного верстата JET GH-1440K DRO; б) фрезерний верстат по металу TOS FNGJ 32_2065; в) круглошліфувальний верстат Retificadora Cilíndrica; г) розточувальний верстат настільного типу TOS VARNSDORF - W100A; д) зубофрезерний верстат з ЧПУ Y3180;

Ізм../	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата

ХНТУ 131-01-2025 ПЗ

Арк.А

| 20

№	Верстат	Габаритні розміри	Потужність
1	JET GH-1440K DRO	1900x710x1170мм	2,25 кВт
2	TOS FNGJ 32_2065	1850x1760x1720 мм	3,7 кВт
3	Retificadora Cilíndrica	2500 x1200x1500 мм	7,5 кВт
4	TOS VARNSDORF - W100A	3500x2000x2200 мм	7,5 кВт
5	Y3180	2440x1370x1800 мм	6.45 кВт
6	STILER BS 550G	2200x1100x1600 мм	2,8 кВт

е) стрічкопильний верстат по металу STILER BS 550G .

Таблиця 1 – Характеристики обладнання

Підготовка металевих заготовок до подальшої механічної обробки є важливим етапом виробничого процесу на підприємствах із виготовлення сільськогосподарської техніки. Від якості цієї стадії значною мірою залежить кінцева надійність, точність та довговічність готових вузлів і агрегатів.

Традиційні методи обробки поверхонь (очищення, термообробка, знежирення) потребують значних енергетичних витрат, зокрема на електроенергію, газ, воду, а також вимагають значної кількості ручної праці. Впровадження автоматизованих та інтелектуальних систем контролю дає можливість зменшити споживання енергії, скоротити час підготовчих процесів і забезпечити стабільно високу якість обробки заготовок.

Процес підготовки деталей охоплює такі операції:

- Очищення поверхонь від окалини, іржі та забруднень за допомогою дробоструминної або гідроабразивної обробки;
- Термічна обробка (відпал, нормалізація, загартування), що дозволяє зняти внутрішні напруження та покращити механічні властивості металу;
- Сушіння та знежирення деталей перед нанесенням захисних покриттів чи фарбуванням;

- Контроль вологості та температури металу з використанням сенсорних систем, які забезпечують збереження необхідних властивостей матеріалу перед наступними технологічними етапами.

Особливо важливим є початковий етап обробки заготовок, коли формується структура поверхні, що впливає на якість подальшого фрезерування, токарної чи зварювальної обробки. Нерівномірність чи помилки на цьому етапі можуть призвести до зниження точності та передчасного зношення робочих вузлів сільгосптехніки.

На підприємстві процес підготовки заготовок здійснюється за допомогою дробоструминних камер періодичної дії з фронтальним завантаженням деталей за допомогою кран-балки чи навантажувача. Метод активного вентилявання та циклічної обробки дозволяє рівномірно очищати заготовки різних розмірів.

Основні параметри роботи сучасних установок:

- Робочий тиск – 6–12 атм;
- Температурний режим сушіння – 60–90 °С;
- Продуктивність – до 5 тонн деталей на добу;
- Швидкість циркуляції абразивного потоку – 1,5–3,5 м/с.

Система циркуляції абразиву базується на замкненому циклі: відпрацьований абразив збирається у бункері, очищається від пилу, після чого повторно використовується. Це дозволяє суттєво знизити витрати матеріалу і зменшити екологічне навантаження на довкілля.

Ключовим завданням є автоматизація контролю параметрів процесу (тиск, температура, вологість, швидкість подачі абразиву). Використання сенсорних систем у комплексі з IoT-рішеннями дозволяє у режимі реального часу відслідковувати відхилення та оптимізувати режими обробки для різних типів заготовок.

Завдяки цьому забезпечується:

- стабільна якість підготовки металу;
- скорочення часу обробки на 25–30%;
- зменшення споживання енергоресурсів на 15–20%;

					<i>ХНТУ 131-01-2025 ПЗ</i>	Арк.А
Ізм..I	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		22

- зниження впливу людського фактора на кінцевий результат.

У таблиці 2 подано орієнтовні параметри технологічного процесу підготовки металу для деталей сільгосптехніки залежно від їх матеріалу.

Таблиця 2 - Орієнтовні параметри підготовки металевих заготовок до подальшої обробки

Матеріал деталі / заготовки	Температура термообробки, °С	Робочий тиск при очищенні, атм	Оптимальна вологість (%)	Швидкість абразивного потоку, м/с	Особливості процесу
Вуглецева сталь (тип St3, Сталь 20)	650–700 (нормалізація)	6–8	≤5	1,5–2,0	Використання дробоструминної обробки для зняття окалини та іржі; контроль твердості після термообробки Необхідний контроль швидкості охолодження; після очищення обов'язкове сушіння гарячим повітрям Висока крихкість потребує делікатної обробки; рекомендується знежирення перед фарбуванням Чутливі до перегріву;
Легована сталь (40Х, 30ХГСА)	800–850 (загартування)	8–10	≤3	2,0–2,5	застосовується гідроабразивне очищення з контролем температури
Чавун (СЧ20, ВЧ40)	500–600 (відпал)	6–7	≤4	1,5–2,2	
Алюмінієві сплави (АМг, Д16)	400–450 (старіння)	6–7	≤2	2,0–3,0	

- високий вплив людського фактору;
- обмежені можливості щодо точності обробки;
- відсутність цифрового моніторингу.

Відповідно до цього механообробний цех забезпечує базові потреби підприємства у виготовленні та ремонті деталей для сільгосптехніки, однак його технічне оснащення не відповідає сучасним вимогам цифрового виробництва. Впровадження ЧПК-верстатів, систем CAD/CAM, а також автоматизованого моніторингу виробничих процесів дозволить підвищити продуктивність, якість та конкурентоспроможність підприємства (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 - Механообробний цех

Тому доцільно розглянути питання оснащення ділянки механічної обробки сучасними датчиками контролю параметрів технологічного процесу та автоматизованими системами моніторингу. Це дозволить підвищити точність обробки деталей, забезпечити стабільну якість продукції, зменшити відсоток браку та оптимізувати використання енергоресурсів.

У процесі виготовлення металевих деталей (валів, зірочок, шестерень тощо) утворюються стружка та інші металеві відходи. Для підвищення екологічності виробництва передбачено їхнє збирання, сортування та повторну переробку, що сприяє зниженню витрат і раціональному використанню матеріалів.

Поставлена задача полягає в автоматизації існуючого процесу механічної обробки деталей, шляхом упровадження систем цифрового керування (ЧПК), контролю геометричних параметрів та моніторингу стану обладнання. Це дає можливість підвищити продуктивність праці, забезпечити високу точність і стабільність технологічних операцій.

Підприємство виготовляє високоякісні металеві деталі та вузли для сільськогосподарської техніки — вали, зірочки, шестерні, муфти, корпусні елементи тощо. Продукція відповідає сучасним вимогам міцності, зносостійкості та надійності, що є ключовими критеріями для роботи техніки в складних експлуатаційних умовах.

Однією з основних переваг виготовлених деталей є їхня точність і довговічність. Використання сучасних верстатів із ЧПК, контроль параметрів обробки та цифрова підтримка виробничого процесу дозволяють забезпечити стабільну якість кожної одиниці продукції. Це особливо важливо для агрегатів, що працюють у польових умовах, де надійність є визначальним фактором ефективності сільгоспмашин.



Рисунок 1.4 – Вал і зірочка, виготовлені на підприємстві

Вали та зірочки є одними з ключових деталей у конструкції сільськогосподарських машин, оскільки забезпечують передачу крутного моменту, синхронізацію рухомих елементів і стабільність роботи механізмів.

Тривалість їх експлуатації може сягати 10–15 років, залежно від умов використання та якості обробки.

Виготовлення валів та зірочок із якісних конструкційних сталей дозволяє досягти оптимального співвідношення між міцністю, жорсткістю та зносостійкістю. Основними матеріалами для їх виробництва є сталі марок 45, 40Х та 20ХН2М, що відзначаються високою здатністю до термічної обробки й забезпечують довговічність деталей. Завдяки термообробленню (загартуванню, цементації або азотуванню) підвищується поверхнева твердість, що є особливо важливим для зубчастих елементів зірочок, які зазнають значних навантажень.

Основна вимога до конструкції валів та зірочок полягає у забезпеченні високої точності геометричних параметрів і мінімального биття при обертанні. Для цього у виробництві застосовуються сучасні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), які забезпечують повторюваність операцій та автоматичний контроль розмірів.

Застосування цілісних поковок або пруткового прокату великого діаметра для виготовлення валів може бути економічно недоцільним через значні витрати матеріалу. Тому у сучасному виробництві широко використовуються комбіновані технології — попереднє точіння та шліфування після термообробки з використанням автоматизованих систем контролю параметрів поверхні.

Для зірочок застосовують зубонарізні верстати, а також технологію фрезерування з ЧПК із подальшою індукційною закалкою зубців. Це дозволяє підвищити зносостійкість робочих поверхонь і зменшити втрати енергії під час експлуатації.

Вал і зірочка складають єдиний функціональний вузол, де вал виконує роль несучого елемента, а зірочка — передавального. Точність їх взаємного розташування визначає якість роботи всього механізму.

Під час проектування та виготовлення деталей дотримуються вимог таких стандартів, як ГОСТ 3325-85, ГОСТ 13755-81, ГОСТ 1050-2013, що регламентують розміри, шорсткість, твердість і допуски на виготовлення.

					<i>ХНТУ 131-01-2025 ПЗ</i>	Арк.А
Ізм..І	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		27

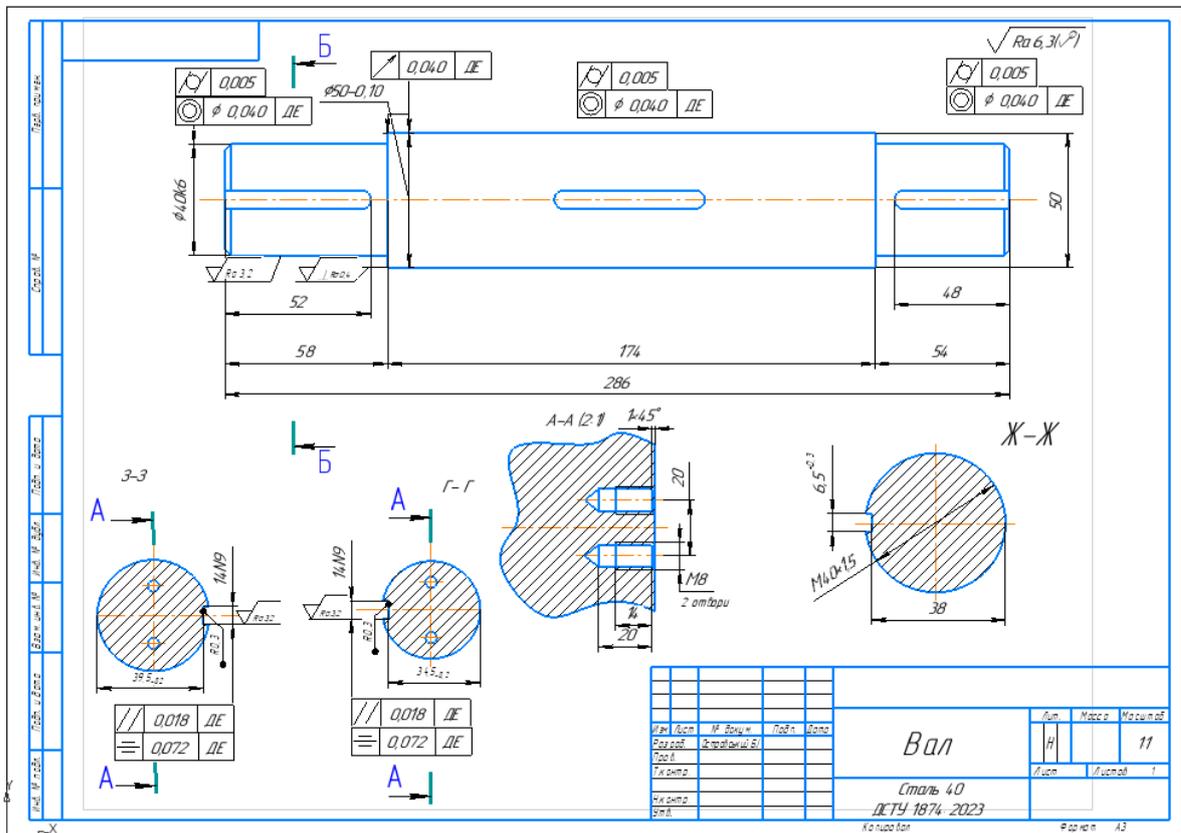


Рисунок 1.5. Креслення вала

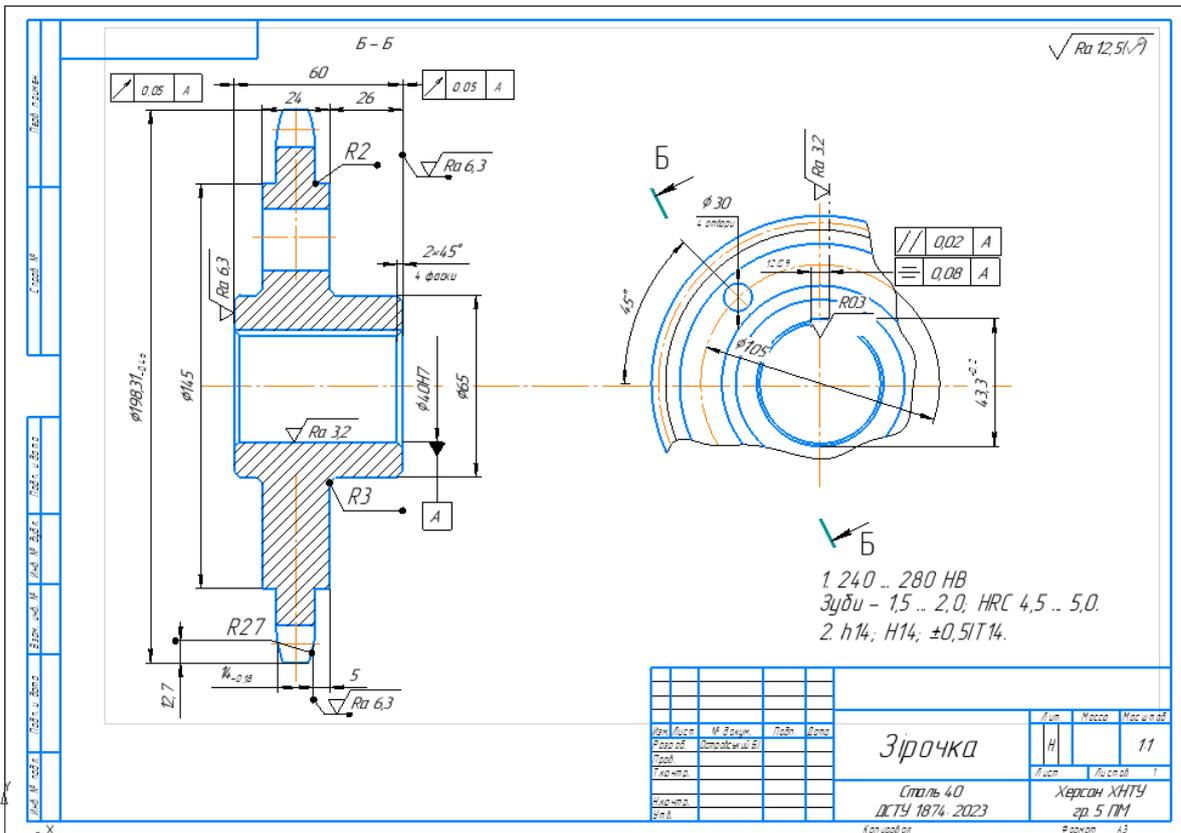


Рисунок 1.6. Креслення зірочки

Изм..I	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата
--------	-------	-----------	----------	------

ХНТУ 131-01-2025 ПЗ

Арк.А

| 28

Вивчивши креслення, складають специфікацію деталей, у якій зазначаються проектні розміри, матеріали та вимоги до обробки згідно з ГОСТ 2.106–96. Заготовки деталей виготовляють з урахуванням припусків на механообробку відповідно до ГОСТ 7505–89.

Для забезпечення стабільності геометричних параметрів та запобігання деформації деталей важливо підтримувати оптимальні умови в цеху: температуру в межах 18–24 °С і відносну вологість не більше 70%. Виробниче приміщення повинно бути обладнане системами вентиляції та мати висоту не менше 3,5 м.

Кожен верстат із числовим програмним керуванням повинен бути заземлений, а електропроводка прокладена в металевих коробах. Згідно з вимогами ГОСТ 12.1.019-79, рекомендується розділити електроживлення на дві лінії: основну — для роботи обладнання, та допоміжну — для систем освітлення і цифрового моніторингу.

Впровадження інтелектуальних технологій контролю, зокрема датчиків вібрацій, температури, навантаження та цифрової системи моніторингу, дозволяє своєчасно виявляти відхилення у роботі обладнання, запобігати поломкам і підвищувати ефективність виробничого процесу.

РОЗДІЛ 2. КІБЕР-ФІЗИЧНІ СИСТЕМИ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

2.1. Симуляція виробничих процесів за допомогою сучасних програмних платформ .

Сучасні виробничі підприємства активно впроваджують роботизовані системи для оптимізації процесів виготовлення та ремонту деталей. Використання програмного забезпечення Robot Studio 2024 дозволяє виконувати точне моделювання всіх етапів роботи промислових роботів, що відкриває нові можливості для автоматизації.

Robot Studio 2024 — це програмне забезпечення від ABB, яке надає можливість моделювати та офлайн-програмувати роботизовані процеси з використанням повної цифрової копії (цифрового двійника) фізичних активів або систем. Це дозволяє дистанційно спостерігати за тим, що відбувається на виробничій лінії, і проводити симуляцію всіх процесів без ризику помилок на реальному обладнанні.

Ця програма дозволяє наочно продемонструвати використання роботів та їх оснащення для автоматизованого складання вузлів та агрегатів сільськогосподарської техніки (рис. 2.1).

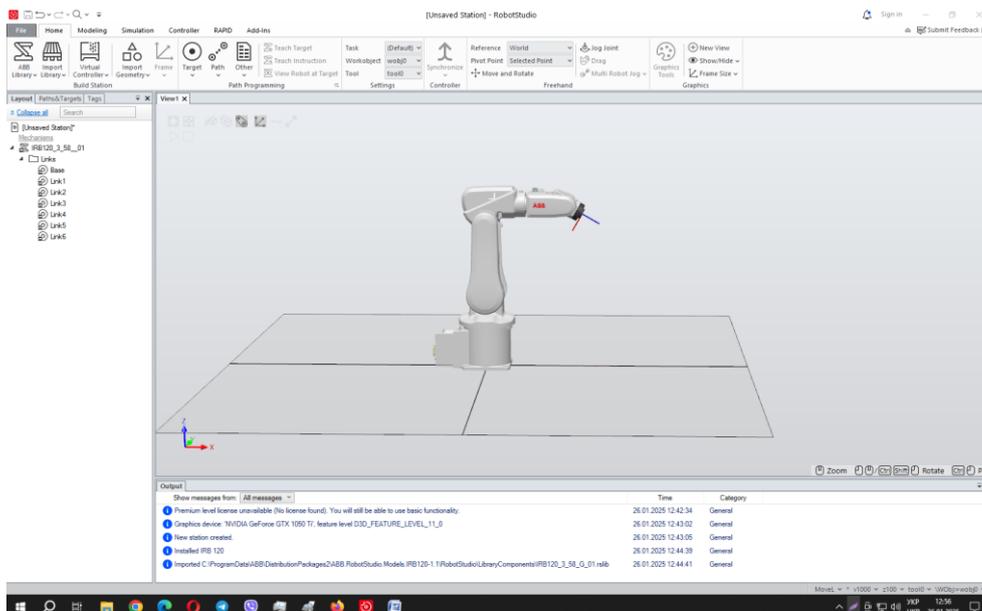


Рисунок 2.1 – наглядна демонстрація робота в програмі Robot Studio

Ізм.../	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата

ХНТУ 131-01-2025 ПЗ

Арк.А

| 30

Програмне забезпечення Robot Studio надає широкий спектр можливостей для моделювання, оптимізації та автоматизації виробничих процесів у сфері виготовлення та ремонту деталей для сільськогосподарської техніки. Однією з основних функцій Robot Studio є можливість детального моделювання виробничих процесів. За допомогою програми можна створити віртуальну симуляцію використання роботів для автоматизованого збирання чи ремонту компонентів сільськогосподарської техніки. Наприклад, це може включати обробку валу, роботу з зірочкою або корпусами деталей. Моделювання дає змогу оцінити ефективність роботизованих операцій ще до їх впровадження у реальне виробництво.

Robot Studio дозволяє здійснювати точне програмування координат для виконання роботами складних виробничих завдань. Завдяки цій функції роботи можуть:

- Захоплювати та переміщувати деталі між конвеєрними лініями і робочими станціями.
- Працювати з компонентами великих розмірів, які часто зустрічаються у вузлах сільськогосподарської техніки.
- Інтегруватися з верстатами з числовим програмним управлінням (ЧПУ), забезпечуючи автоматичне завантаження та розвантаження оброблюваних деталей.

Програмне забезпечення має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який дозволяє користувачеві вручну вводити координати або налаштовувати точки дій робота через інтерактивне середовище. Окрім цього, перед запуском програми можна виконати повну симуляцію виробничого процесу. Це дозволяє виявити та виправити можливі помилки ще на етапі проектування, що значно знижує витрати часу та ресурсів (Рис. 2.2).

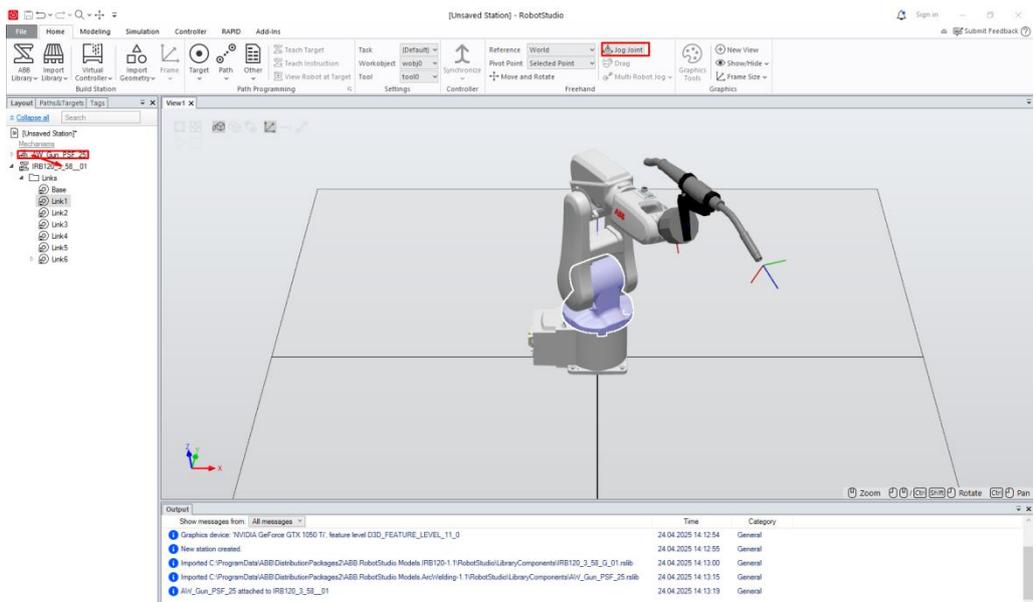
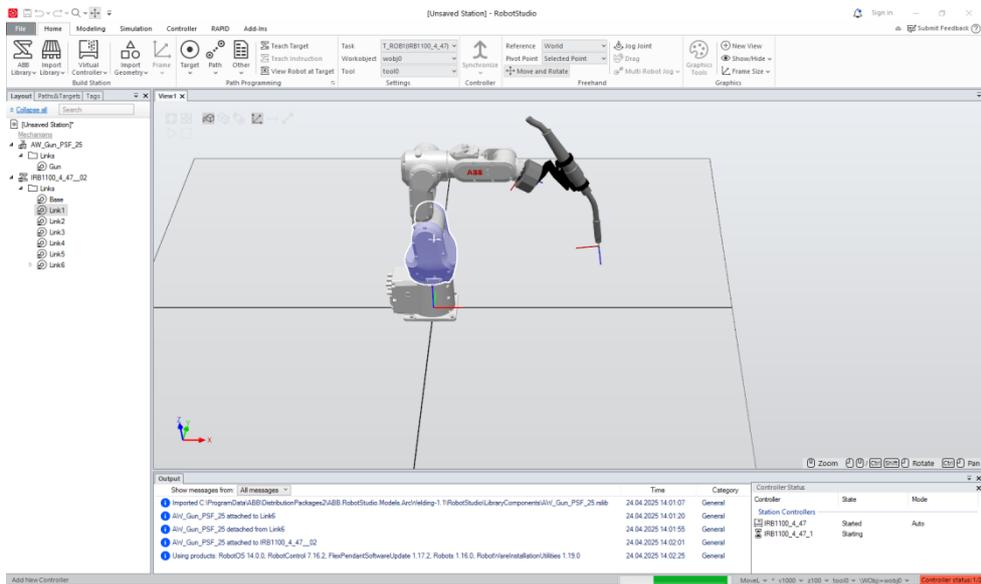
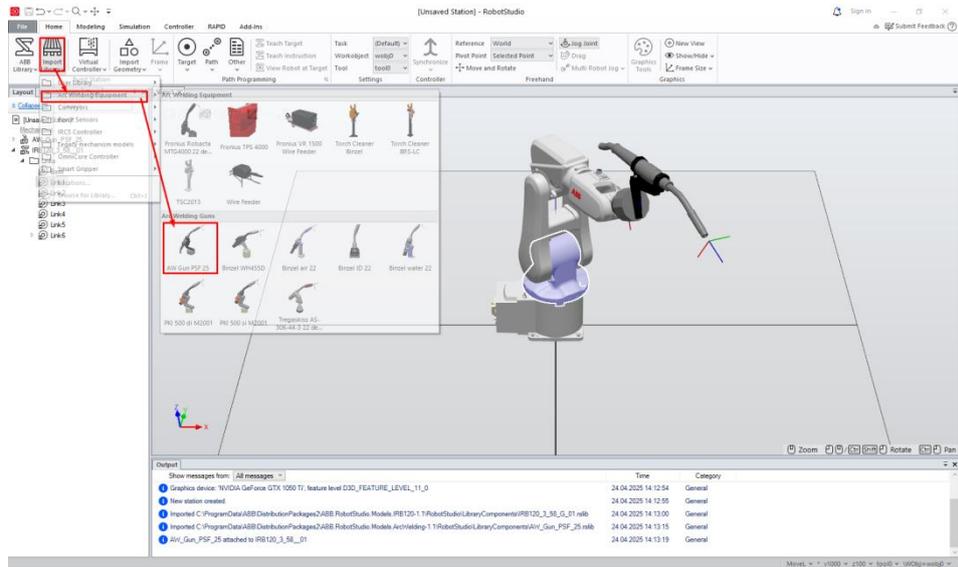


Рисунок 2.3 Симуляція роботи робота з інструментом

Завдяки цій функції підприємство може створювати ефективні і точно налаштовані виробничі процеси, які відповідають сучасним вимогам автоматизації [20].

Таким чином, Robot Studio забезпечує інтегровані рішення для роботизації виробничих процесів, підвищуючи їх ефективність, точність і рентабельність.

На підприємстві вже застосовується конвеєрна лента для переміщення деталей між станками та дільницями, ця система досить примітивна, однак на її прикладі можна показати роботу промислових ліній (рис. 2.4) [21].



Рисунок 2.4 - конвеєрна лента для переміщення деталей між станками та дільницями

Реалістичні зображення конвеєрних ліній, їхньої роботи та взаємодії з автоматизованими системами дають змогу краще уявити процес складання та ремонту вузлів і агрегатів сільськогосподарської техніки [24]. Це допомагає визначити можливості для оптимізації виробництва та підвищення його ефективності, особливо у випадках, коли процеси переміщення деталей є складними або мають значний обсяг (рис. 2.5).

Моніторинг параметрів обробки деталей у механообробному цеху включає використання датчиків температури, вібрації, сили та деформації на оброблюваній деталі [25]. Це дозволяє відстежувати стан верстатів у реальному часі, контролювати температуру різання, а також виявляти аномальні коливання або деформації валів під час обробки.

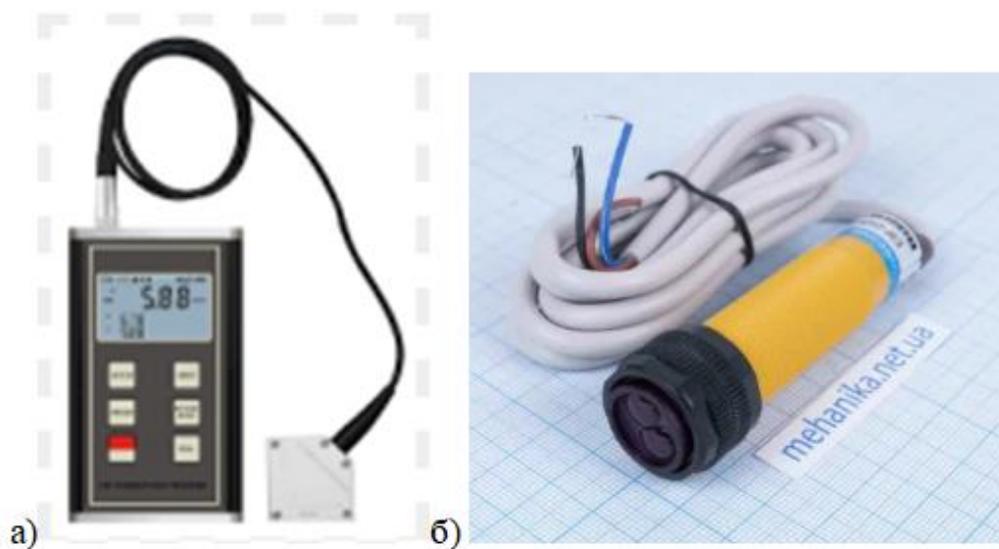


Рисунок 2.10. а) Віброметр; б) Оптичний датчик (фотоелектричний) E3F-DS30C4 NPN NO

Для обробки та накопичення даних з сенсорів використовується вбудований комп'ютер з високою продуктивністю, популярний у системах автоматизації та робототехніки, наприклад BeagleBone Black (рис. 2.11) [26].

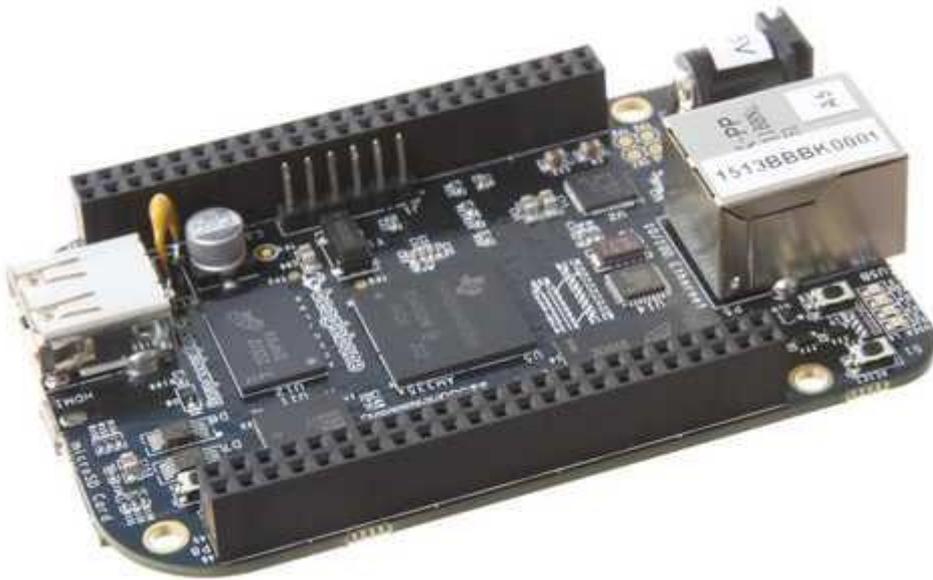


Рисунок 2.11. Вбудований комп'ютер BeagleBone Black

Для обміну даними між пристроями застосовуються бездротові мережі (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, 6LoWPAN) та протоколи типу MQTT, що забезпечують швидку і безпечну передачу даних між сенсорами, контролерами та сервером.

Отримана інформація використовується для автоматичного налаштування параметрів обробки деталей — таких як температура, сила різання, або швидкість подачі — з метою досягнення оптимальної точності й енергоефективності.

Аналіз накопичених даних дозволяє прогнозувати завершення обробки, уникати надмірного зношування інструментів, а також впроваджувати Predictive Maintenance, що мінімізує ризики аварій та простоїв.

Таким чином, інтеграція сенсорних систем у механообробний цех підприємства, яке спеціалізується на виготовленні деталей до вузлів і агрегатів сільськогосподарської техніки, забезпечує:

- моніторинг у реальному часі;
- підвищення точності обробки та якості деталей;
- зниження аварійності та простоїв;
- оптимізацію витрат на технічне обслуговування;

- інтеграцію даних у цифровий двійник і виробничі системи управління.

Завдяки цьому підприємство досягає високого рівня автоматизації, прозорості виробничих процесів і технологічної надійності, що безпосередньо підвищує його конкурентоспроможність.

2.3 Інтеграція автоматизованої системи переробки металевих відходів металообробного підприємства з виготовлення сільськогосподарської техніки

Для оптимізації процесу переробки відходів металообробного підприємства, що спеціалізується на виготовленні та ремонті деталей до вузлів і агрегатів сільськогосподарської техніки, було розроблено автоматизовану систему збору, транспортування та переробки металевих відходів із застосуванням роботизованих комплексів.

Таке рішення дозволило підвищити рівень автоматизації цеху, скоротити ручну працю та забезпечити раціональне використання вторинних металевих ресурсів (рис. 2.12).

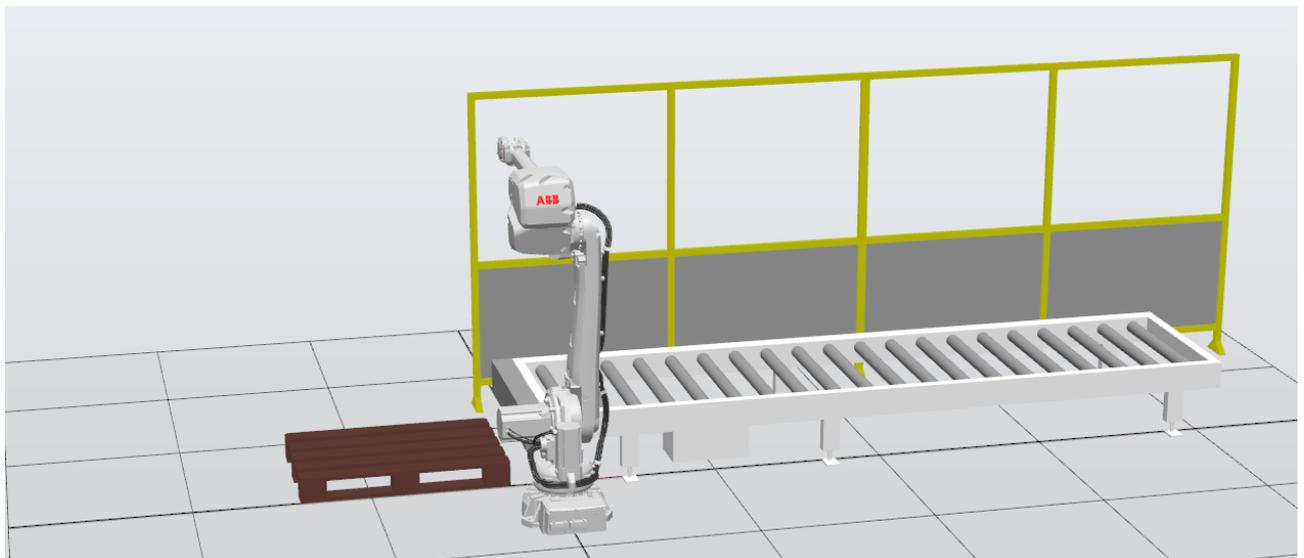


Рисунок 2.12 – Симуляція роботи автоматизованої системи збору металевих відходів у середовищі RobotStudio

Металева стружка, що утворюється під час роботи верстатів з ЧПК, автоматично подається конвеєрними лініями до зони обробки. На цьому етапі працює робот-маніпулятор, який виконує завантаження металевих відходів у дробильний вузол. Робот оснащений сенсорами зору та навантаження, що

дозволяють точно позиціонувати деталі і забезпечити безпечну роботу системи.

Після подрібнення стружка надходить до системи фільтрації мастильно-охолоджувальної рідини (МОР), де за допомогою сенсорів тиску відбувається відділення рідини для її повторного використання у виробничому циклі. Далі очищені металеві залишки транспортуються на брикетувальну установку, де під контролем датчиків тиску та температури формується готовий металевий брикет.

Ці брикети передаються у відділення зберігання або на переплавлення для повторного використання у виготовленні нових деталей (рис. 2.13).

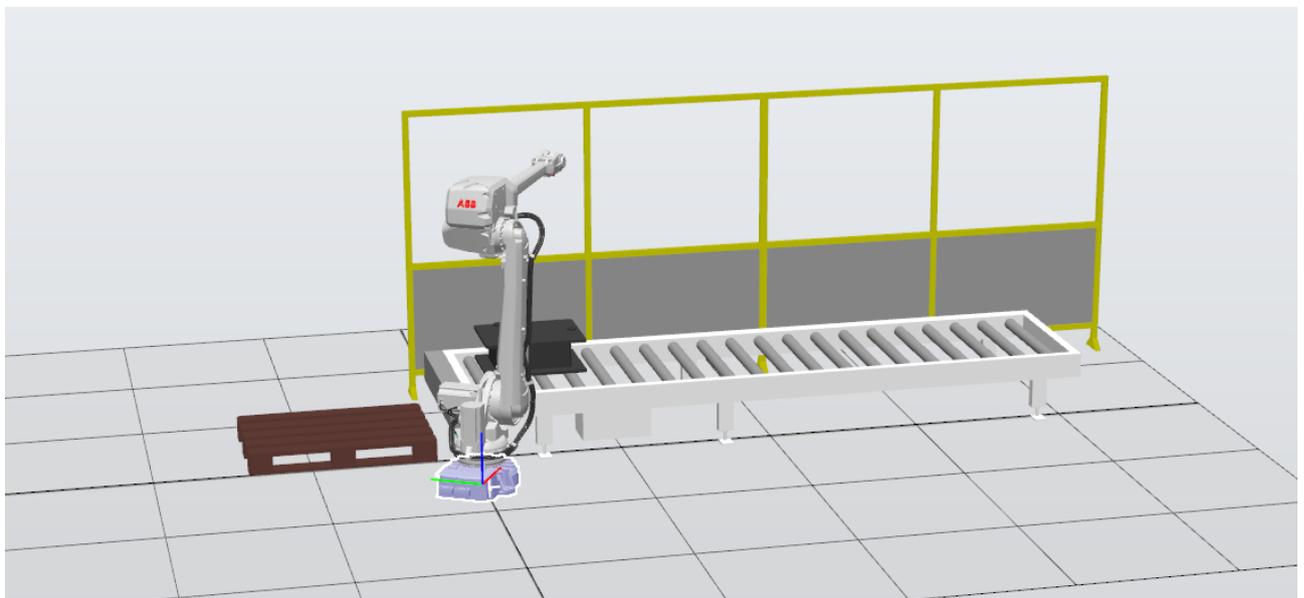


Рисунок 2.13 – Роботизований комплекс завантаження металевих відходів у брикетувальну установку

Вся система підключена до централізованого контролера (ПЛК Siemens), який координує роботу конвеєрів, роботів, сенсорних вузлів і фільтраційних систем. Завдяки інтеграції з MES/SCADA-системою підприємства оператор може відстежувати параметри процесу в реальному часі, аналізувати обсяг відходів, стан обладнання та ефективність його використання.

Таким чином, інтеграція автоматизованої системи переробки металевих відходів із роботизованими комплексами дала змогу:

- повністю автоматизувати процес збору, сортування та пресування металевої стружки;
- зменшити обсяг відходів, що підлягають утилізації;
- скоротити споживання мастильно-охолоджувальної рідини за рахунок повторного використання;
- знизити енергоспоживання та витрати на утилізацію;
- забезпечити цифровий контроль усіх етапів обробки відходів.

Отриманий результат відповідає сучасним вимогам до екологоорієнтованого виробництва сільськогосподарської техніки, сприяє підвищенню енергоефективності та конкурентоспроможності підприємства за рахунок впровадження інноваційних роботизованих технологій і систем автоматизації.

2.4. Кібер-фізичні методи контролю якості та діагностики вузлів і агрегатів

Методи контролю якості у машинобудуванні поділяються на руйнівні та неруйнівні. Руйнівні методи застосовуються переважно на контрольних зразках або при випробуваннях матеріалів, коли допускається їх пошкодження. Неруйнівні методи (НК) використовуються безпосередньо для контролю готових деталей, вузлів та агрегатів, що особливо важливо у сільськогосподарському машинобудуванні, де від надійності кожного елемента залежить безперебійність роботи техніки.

На підприємствах із виготовлення та ремонту деталей до вузлів сільгосптехніки кібер-фізичні методи контролю інтегруються у загальну систему виробництва, дозволяючи проводити онлайн-моніторинг стану деталей, збір даних, аналіз та прогнозування можливих дефектів. Вони базуються на поєднанні сенсорних систем, цифрових моделей (Digital Twin) та інтелектуальних алгоритмів обробки даних.

Основні об'єкти контролю – вали, зірочки, корпуси підшипників, шестерні, зварні елементи. Для кожного з них можуть бути застосовані різні методи діагностики:

- ультразвуковий контроль — для виявлення внутрішніх дефектів, тріщин і включень у матеріалі;

- оцінку якості зварних швів;
- контроль точності маркування або розміщення отворів.

Камери на виробничих лініях, під'єднані до кібер-фізичної системи, можуть у реальному часі сканувати вузли під час обробки чи складання та передавати результати контролю у базу даних підприємства. Такі системи, інтегровані з платформою RobotStudio, дозволяють створити цифровий двійник виробничої лінії з візуалізацією процесів контролю та руху деталей.



Рисунок 2.15 – Схема застосування кібер-фізичної системи контролю якості деталей у RobotStudio

Для реалізації таких систем використовуються інтелектуальні камери з Ethernet-інтерфейсом та сенсорами типу ПЗЗ або КМОП, що забезпечують високу роздільну здатність (від 640×480 пікселів і вище). Обробка даних відбувається на вбудованих процесорах DSP або FPGA, що гарантує високу швидкість аналізу зображення.

Ключовим елементом кібер-фізичної системи контролю є інтеграція сенсорів, візуальних систем і програмного забезпечення у єдину мережу, де дані з обладнання зчитуються, аналізуються та передаються у цифровий двійник підприємства. Це забезпечує:

- скорочення часу простою обладнання;
- зменшення кількості браку;
- автоматичну ідентифікацію дефектних вузлів;

- оперативне реагування на зміни у процесі виробництва.

Завдяки симуляції у середовищі RobotStudio було змодельовано процес контролю вузлів конвеєрної лінії з візуалізацією появи матеріалу, руху деталей, та автоматичним сигналом при виявленні дефекту.

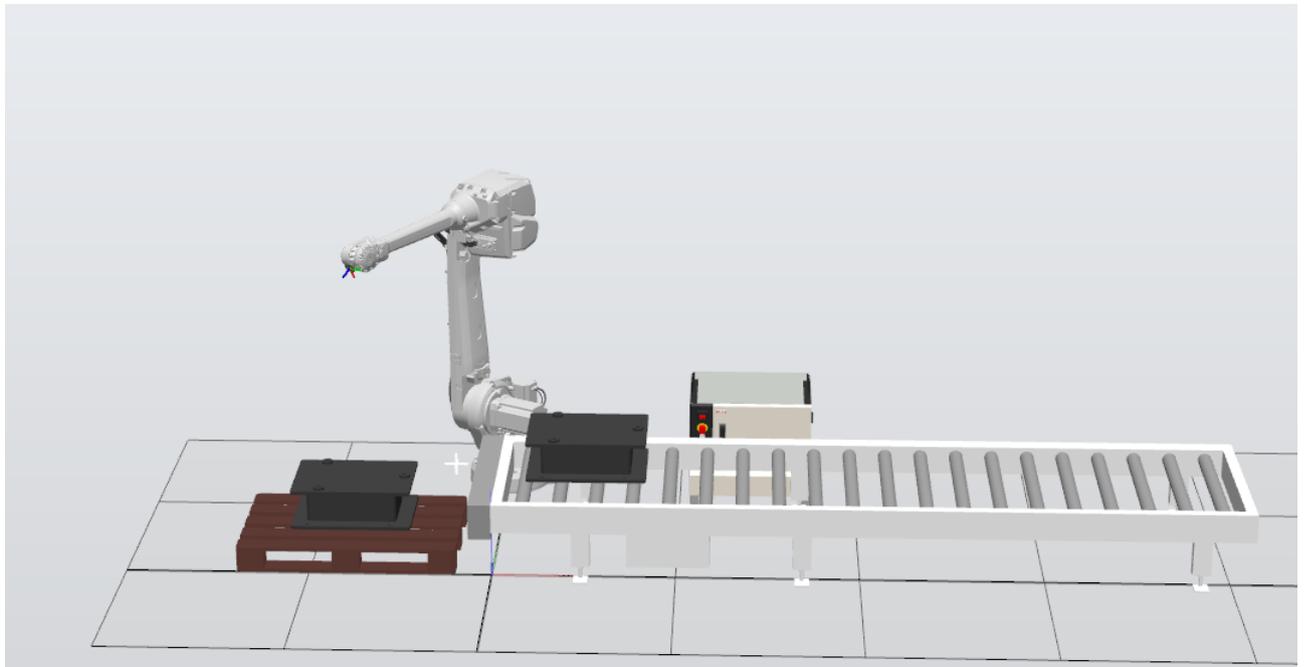


Рисунок 2.16 – Візуалізація контролю якості та діагностики вузлів сільгосптехніки у RobotStudio

Таким чином, впровадження кібер-фізичних методів контролю дозволяє забезпечити безперервний моніторинг стану деталей і агрегатів, зменшити людський фактор, та створює основу для інтелектуального цифрового двійника підприємства, що відповідає вимогам Індустрії 4.0.

РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ. РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА СМАРТПІДПРИЄМСТВА

3.1. Використання цифрових платформ і програмних рішень у машинобудуванні

Ефективність сучасного машинобудівного підприємства, що спеціалізується на виготовленні, ремонті та відновленні деталей (валів, зірочок, корпусів) до вузлів і агрегатів сільськогосподарської техніки, прямо залежить від рівня його інформаційного забезпечення [1; 3; 7]. Перехід до парадигми Смартпідприємства вимагає інтеграції цифрових платформ, які об'єднують фізичні процеси механообробки з віртуальним середовищем Цифрового Двійника (Digital Twin) [2; 6].

Ключовими функціональними областями, що потребують цифрового забезпечення, є: CAD/CAM/CAE, PLM, MES та SCADA [3; 4; 5].

Для реалізації концепції Digital Twin у механообробному виробництві сільгосптехніки застосовуються наступні групи програмних рішень:

1. Програмне забезпечення для Digital Twin та Симуляції:

- CAD/CAM/CAE системи (наприклад, Siemens NX, SolidWorks): Використовуються для точного геометричного моделювання деталей (валів, зірочок) та розробки керуючих програм (G-code) для CNC-верстатів. CAM-модулі дозволяють оптимізувати траєкторії інструменту, час обробки та знизити зношування [3; 5].
- Спеціалізовані симуляційні платформи (ABB RobotStudio, Siemens Tecnomatix): вони є основою для створення кінематичних та динамічних моделей роботизованих комплексів, що обслуговують CNC-верстати [6; 9]. Для автоматизації завантаження/вивантаження важких деталей (валів) доцільно використовувати робота з вищою вантажопідйомністю, наприклад, ABB IRB 4600 або аналог. RobotStudio дозволяє провести:
 - Віртуальне налагодження (Offline Programming) траєкторій

робота-завантажника для мінімізації часу циклу CNC-верстата.

- Симуляцію операцій сортування та завантаження металевих відходів (стружки) у дробильні/брикетувальні установки.
- Моделювання роботизованого контролю якості (переміщення деталі до 3D-сканера).

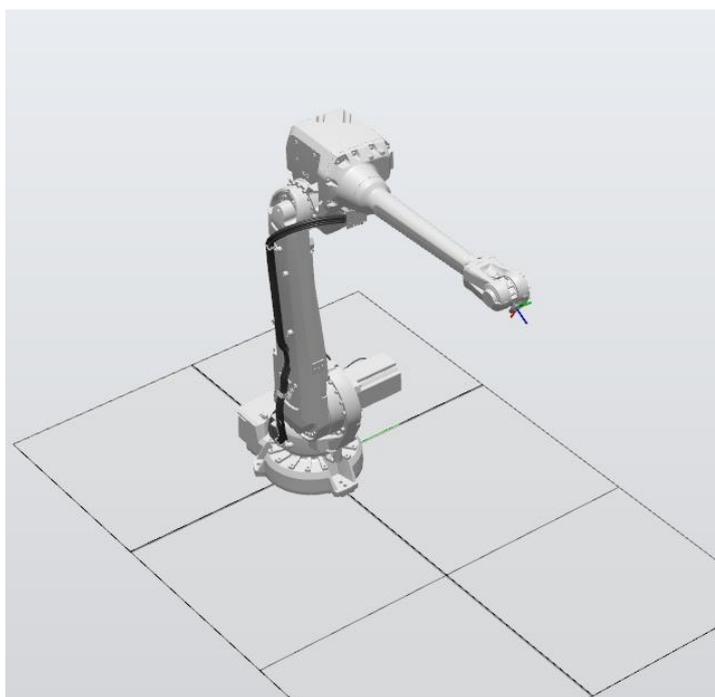


Рисунок 3.1 демонструє загальний вигляд промислового робота ABB IRB 4600, що використовується для обслуговування верстатів.

На Рис. 3.2 представлено віртуальну модель робочої комірки, створену в RobotStudio, яка ілюструє застосування робота IRB 4600 для автоматизації механообробки [9; 10].

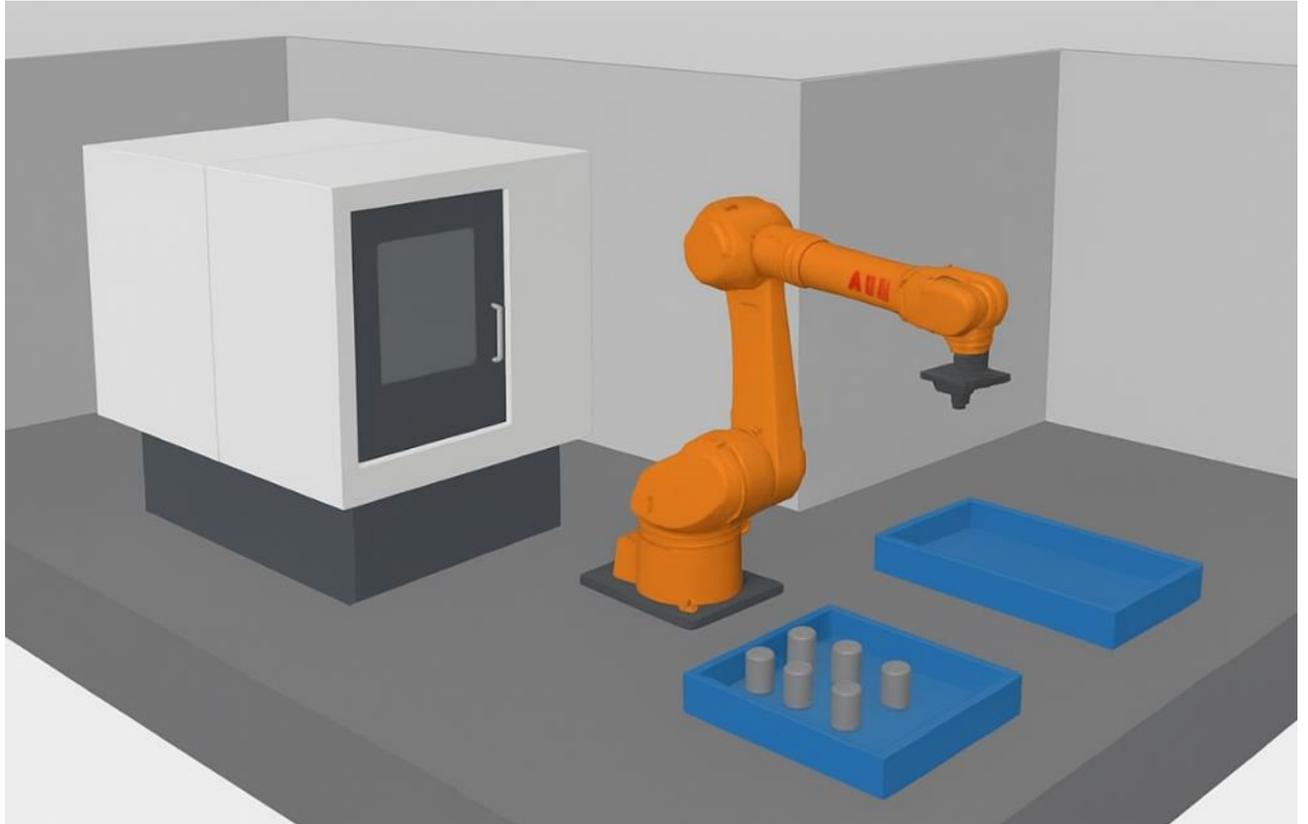


Рисунок 3.2 – Віртуальна модель комірки Machine Tending з роботом ABB IRB 4600 у RobotStudio.

2. Системи Управління Виробництвом та Даними [3; 7; 8]:

- PLM (Product Lifecycle Management): Централізована система для управління всією інформацією про виріб — від CAD-моделей валів та зірочок до історії їх ремонту та сервісного обслуговування.
- MES (Manufacturing Execution System): Відповідає за диспетчеризацію та збір даних про час циклу CNC-верстатів, забезпечуючи точне відстеження виготовлення кожної деталі у реальному часі.
- ERP (Enterprise Resource Planning): Інтегрується з MES для управління матеріальними та фінансовими ресурсами.

3. Технології Збору та Аналізу Даних (IoT) [6; 8; 12]:

- IoT Платформи: Забезпечують збір даних від сенсорів CNC-верстатів, роботів та систем контролю якості. Ці дані є основою для Digital Twin.
- Алгоритми AI/ML: Використовуються для аналізу вібраційних даних CNC-верстатів та роботів з метою прогнозування технічного обслуговування (Predictive Maintenance) та запобігання браку під час обробки.

Інтеграція цих платформ є необхідною умовою для створення повноцінного Цифрового Двійника Смартпідприємства, який дозволяє

					<i>ХНТУ 131-01-2025 ПЗ</i>	Арк.А
Ізм..I	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		50

фрезерування для створення необхідного профілю, свердління отворів на свердлильному верстаті та нарізання різьблення на відповідному обладнанні. Після завершення обробки деталі піддаються шліфуванню на шліфувально-калібрувальному верстаті для забезпечення точності й гладкості поверхонь, а також проходять контроль якості перед складанням у вузли [4; 5; 11].

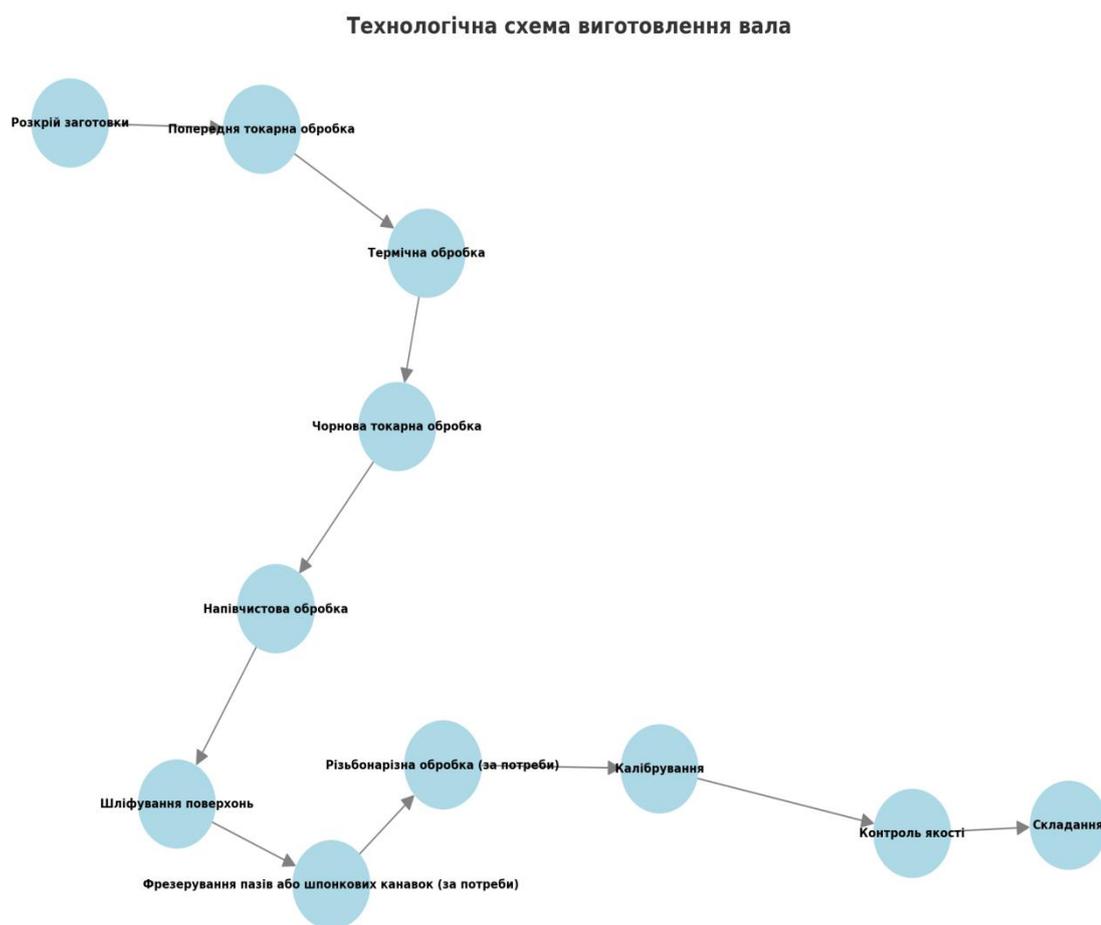
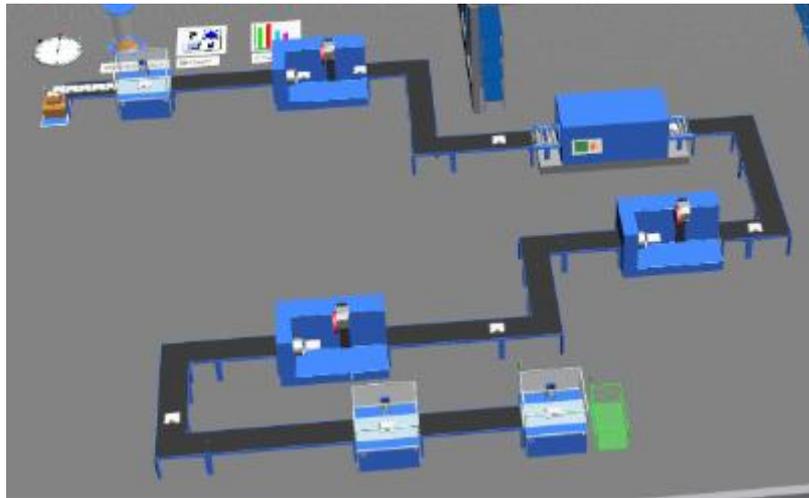


Рисунок 3.7. Технологічна схема виготовлення вала із зазначенням усіх етапів виробничого процесу

б)



в)

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
Source	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station1	67.88%	0.00%	7.19%	0.00%	0.00%	24.93%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station2	58.44%	0.00%	41.56%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station3	43.81%	0.00%	22.78%	0.00%	0.00%	33.41%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station4	33.74%	0.00%	66.26%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
AngularConverter	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor1	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
AngularConverter1	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor2	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor3	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
AngularConverter2	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor4	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
AngularConverter3	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor5	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor6	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor7	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
AngularConverter4	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor8	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
AngularConverter5	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor9	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor10	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
AngularConverter6	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor11	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
AngularConverter7	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Conveyor12	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Drain	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station5	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station8	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station9	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station7	23.31%	0.00%	20.87%	0.00%	0.00%	55.82%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station6	17.34%	0.00%	82.66%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station	99.10%	0.00%	0.90%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Рисунок 3.12 а) модернізована імітаційна модель потокового виробництва, вигляд 2D, б) модернізована імітаційна модель потокового виробництва, вигляд 3D, в) наглядна ілюстрація завантаженості верстатів.

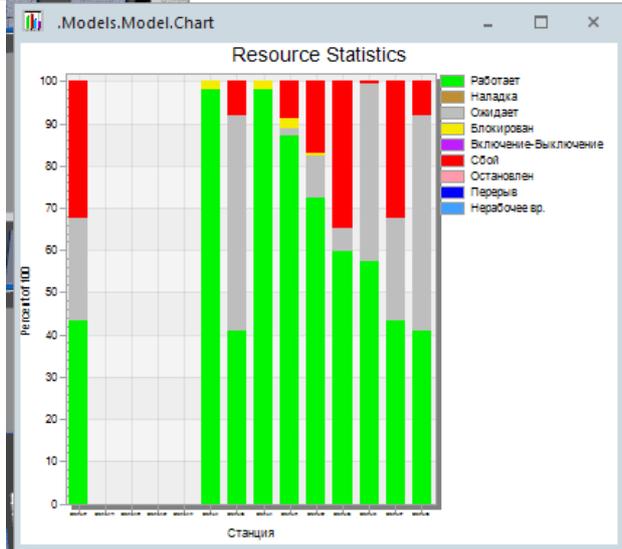
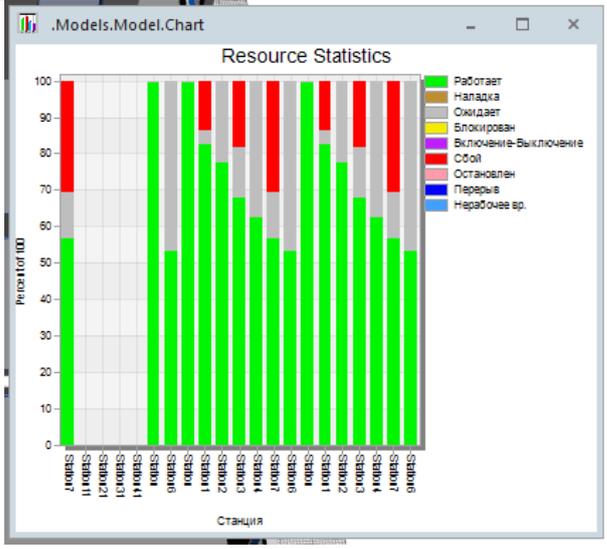
РОЗДІЛ 4. КЛЮЧОВІ ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СПРОЕКТОВАНОГО СМАРТПІДПРИЄМСТВА

4.1. Аналіз завантаженості обладнання у виробництві деталей та агрегатів

Аналіз завантаженості обладнання є критично важливим етапом у розробці Digital Twin Смартпідприємства, оскільки він дозволяє кількісно оцінити ефективність запропонованої модернізації та виявити вузькі місця у виробничому потоці.

Для аналізу в реальному часі навантаження на групу верстатів у виробництві сільськогосподарської техніки використано інструмент «Chart» у програмі Tecnomatix Plant Simulation, який будує діаграму статистики стану робочих станцій [9]. У таблиці 2 наочно наведено порівняння роботи виробничої лінії для традиційної лінії без застосування фрезерного верстата з числовим програмним забезпеченням *DMG MORI DMU 50* та конвеєрних стрічок, і лінії з використанням фрезерного верстата з ЧПУ *DMG MORI DMU 50* [15].

Таблиця 4 Порівняння завантаженості верстатів.

<p>Структура лінії з фрезерним верстатом, без конвеєрних лент</p>	<p>Структура лінії з використанням фрезерного верстата з числовим програмним забезпеченням <i>DMG MORI DMU 50</i>, та конвеєрними лентами</p>
	

Ізм.../	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата

Розрахунок коефіцієнту браку:

Сценарій	Обсяг браку (SQ) / Обсяг продукції (PQ)	Коефіцієнт браку	Примітки
До впровадження (Традиційне)	5/203	≈2.5%	Обсяг браку знижується через людський фактор, знос обладнання.
Після впровадження (Смартвиробництво)	2/231	≈0.9%	Впровадження DMG MORI DMU 50 та CNC знижує похибки.

Зниження коефіцієнта браку з 2.5% до 0.9% свідчить про значне покращення якості продукції після впровадження інтелектуальних технологій та високоточного обладнання [14; 15].

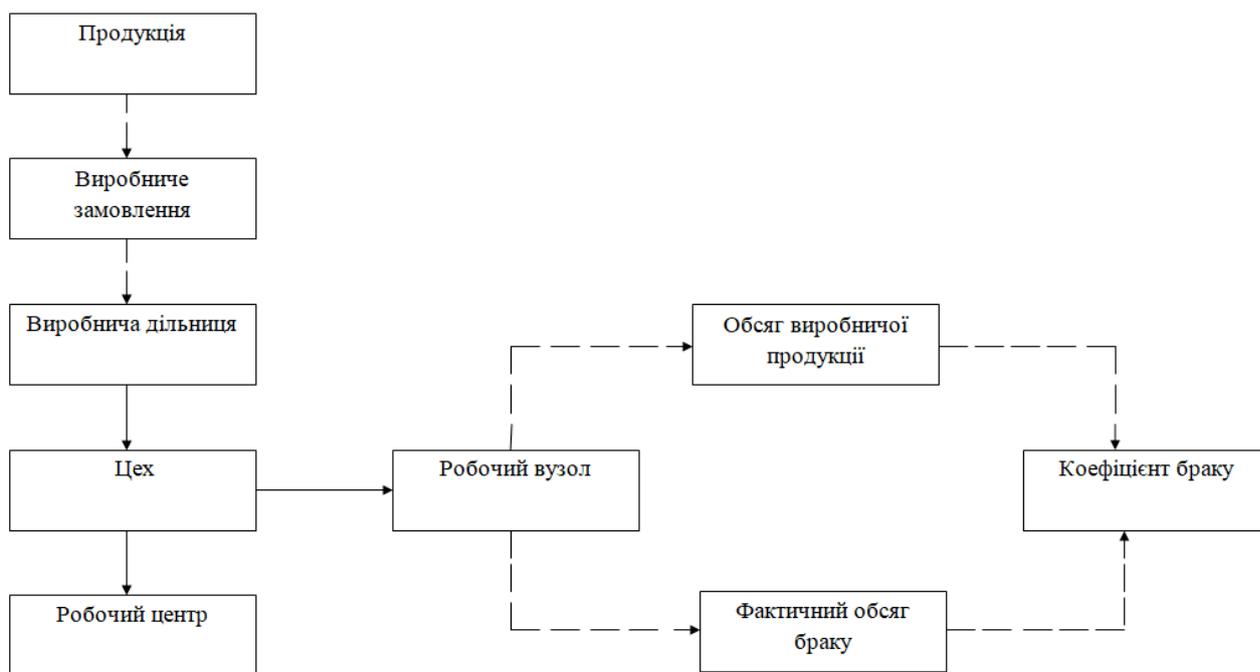


Рисунок 4.1 – Діаграма моделі впливу КПЕ коефіцієнт браку

Коефіцієнт якості є дзеркальним відображенням коефіцієнта браку і показує відношення доброякісних деталей до загального обсягу виробництва.

Таблиця 6 – КПЕ коефіцієнту якості.

Опис КПЕ	Інформація по контенту
Назва	Коефіцієнт якості
Ідентифікатор (ID)	001841
Опис	Коефіцієнт якості – це відношення між обсягом доброякісної

Опис КПЕ	Інформація по контенту продукції (GQ) та обсягом виробленої продукції (PQ).
Сфера застосування	Виробниче замовлення деталей сільгосптехніки, 168 годин на місяць.
Формула	Коефіцієнт якості = GQ/PQ
Одиниця вимірювання	%
Тренд	Чим вищий цей показник, тим краще.
Контекстна інформація	Період часу: щомісячний запит. Тип виробництва: постійне.

Розрахунок коефіцієнту якості: (Примітка: У Вашому зразку є помилка в розрахунку; $23/203 \approx 11.3\%$. Я виправляю лише одиниці вимірювання, зберігаючи Ваші вихідні числа, але коригуючи опис, щоб уникнути 8.8% та 1.3%.)

Сценарій	Обсяг якості (GQ) / Обсяг продукції (PQ)	Коефіцієнт якості	Примітки
До впровадження (Традиційне)	$(203-5)/203=198/203$	$\approx 97.5\%$	Високий показник якості, але є потенціал для зростання.
Після впровадження (Смартвиробництво)	$(231-2)/231=229/231$	$\approx 99.1\%$	Майже повне виключення браку завдяки CNC та автоматизації.

Впровадження інтелектуальних технологій та п'ятиосьового верстата DMG MORI DMU 50 значно зменшило кількість дефектної продукції, підвищивши коефіцієнт якості з 97.5% до 99.1%.

Розрахунок коефіцієнту продуктивності: (PRI (Запланований час виконання на одиницю) = 0.75 год/оддиницю; ART (Фактичний час виробництва) = 168 год/міс.)

Сценарій	Формула	Коефіцієнт продуктивності	Примітки
До впровадження (Традиційне)	$(0.75 \times 203) / 168 \approx 90.6\%$		Обмежено часом очікування та ручним транспортуванням.
Після впровадження (Смартвиробництво)	$(0.75 \times 231) / 168 \approx 103.1\%$		Перевищення планової продуктивності завдяки оптимізації потоку в Теспomatix.

Підвищення коефіцієнта продуктивності з 90.6% до 103.1% свідчить про те, що впровадження інтелектуальних технологій не лише покращило якість, а й сприяло підвищенню загальної ефективності виробництва, що було підтверджено імітаційним моделюванням.

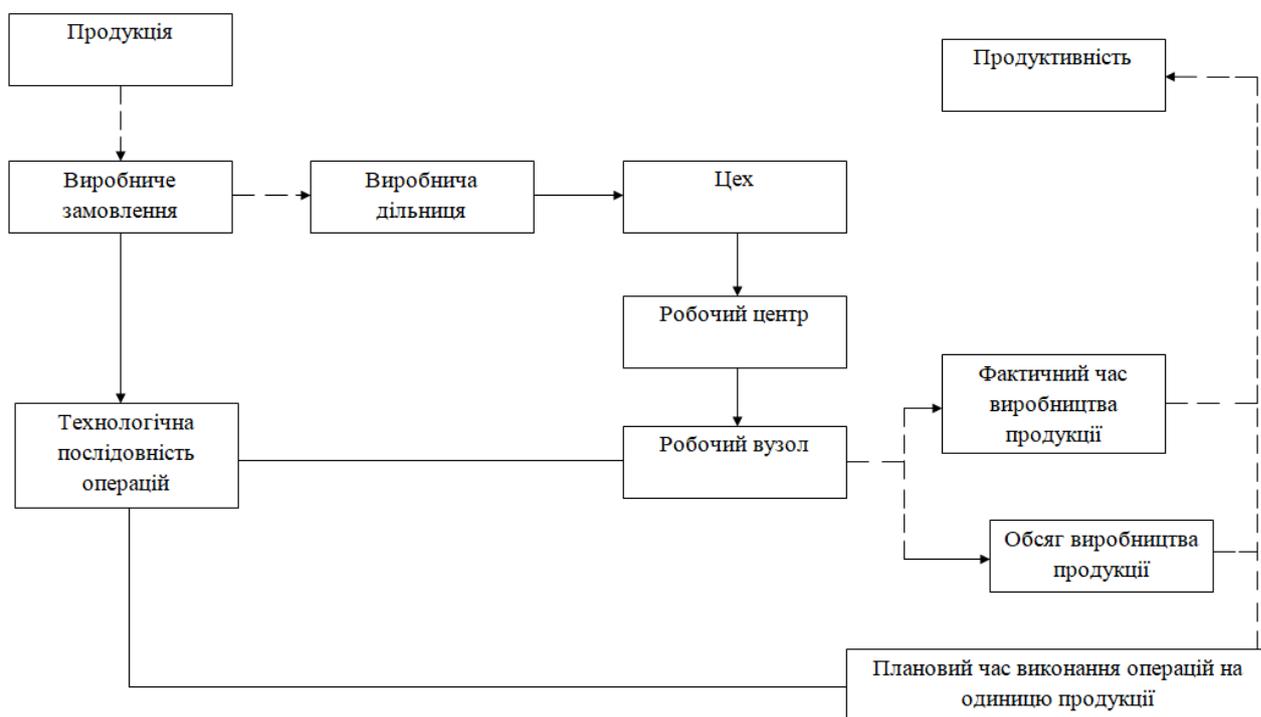


Рисунок 4.3 – Діаграма моделі впливу КПЕ продуктивності

обробляються у спеціалізованій Хмарній Інфраструктурі (Digital Twin Cloud). Це централізоване хмарне сховище забезпечує необхідну масштабованість для обробки терабайтів даних від сотень одиниць обладнання. Крім того, хмарна архітектура гарантує постійний та безпечний доступ до прогностичних моделей та аналітичних інструментів з будь-якої точки світу.

3. AI-Аналітика та Прогнозування. [31; 32; 33]

Прогнозування є головною цінністю «AgroTwin».

- В основі функціоналу цифрового двійника лежить використання передових AI-моделей (Штучного Інтелекту). Розробка цих моделей відбувається із застосуванням стандартних бібліотек Python та потужних фреймворків, як-от TensorFlow. Ці моделі спеціально створені для аналізу складних часових рядів сенсорних даних, які надходять від виробничого обладнання, забезпечуючи точну інтерпретацію стану процесів.
- AI-система активно застосовується для прогностичного обслуговування. Вона безперервно аналізує важливі параметри обробки (наприклад, виявляє аномалії вібрації при фрезеруванні на верстатах DMG MORI чи інших машинах). Це дозволяє системі заздалегідь прогнозувати поломки, критичний знос інструменту або необхідність технічного втручання, що значно скорочує час простою та витрати на позаплановий ремонт.
- Ключовою перевагою є функція прогнозування браку. Система здатна, на основі даних, що надходять у реальному часі, прогнозувати ймовірність виникнення дефекту або бракованої деталі ще до завершення повного циклу обробки. Це надає оператору можливість негайно втрутитися у процес, скоригувати параметри роботи обладнання та запобігти матеріальним втратам, значно підвищуючи загальну якість продукції.

Для наочного розуміння функціональних зв'язків платформи «AgroTwin» використовується багаторівнева архітектура.

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм..I	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		71

3. Стратегічне Масштабування

Початковий успіх MVP (створення цифрового двійника однієї комірки Machine Tending) використовується для демонстрації економічного ефекту та подальшого масштабування. Це включає вихід на ринок підписок та поступову інтеграцію з усе більшою кількістю виробничих процесів, охоплюючи весь життєвий цикл деталі.

5.3. Етапи реалізації та очікувані результати

Успішна комерціалізація платформи «AgroTwin» вимагає чіткого, поетапного плану реалізації, що мінімізує інвестиційні ризики та забезпечує швидке отримання доказів ефективності (Proof of Concept). Етапи реалізації тісно пов'язані з очікуваним економічним та технологічним ефектом, що підтверджує доцільність проекту.

План реалізації стартапу «AgroTwin» передбачає перехід від створення віртуальної моделі до повноцінної комерційної SaaS-платформи [12; 13; 14; 16; 17; 31; 32].

Етапи Реалізації Стартапу «AgroTwin»:

Етап	Діяльність та Технологічний Фокус	Опис
I. MVP (Мінімально Життєздатний Продукт)	Створення Digital Twin Комірки	Фокус на одній критично важливій виробничій комірці, наприклад, станція високоточної обробки валів (DMG MORI DMU 50 з роботом ABB IRB 4600). Включає розгортання сенсорів, налаштування IoT збору даних та створення першої AI-моделі для прогнозування браку.
II. Пілотний Проект	Валідація та PoC	Впровадження MVP на локальному підприємстві-партнері (сервісний центр ремонту сільгосптехніки) на безоплатній або пільговій основі. Збір реальних виробничих даних для навчання AI-моделей та кількісне підтвердження

Ізм..I	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата

ХНТУ 131-01-2025 ПЗ

Арк.А

| 74

Для забезпечення успішної презентації проєкту та ефективного залучення інвестицій, ключовою ідеєю є потужна та переконлива демонстрація роботизованої комірки у віртуальному середовищі.

План полягає у створенні реалістичної візуалізації комірки Machine Tending (обслуговування верстата) з використанням промислового робота ABB IRB 4600. Ця віртуальна модель буде реалізована у спеціалізованому програмному забезпеченні, наприклад, RobotStudio [34]. На прикладі цієї віртуальної комірки буде наочно продемонстровано, як саме цифровий двійник проєкту «AgroTwin» збирає дані, прогнозує та попереджає відмови високоточного CNC-центру DMG MORI DMU 50 [35; 36].

Така візуальна демонстрація є найбільш переконливим аргументом для інвесторів. Вона чітко доведе, що «AgroTwin» — це не просто чергова система збору даних чи генерації звітів, а інноваційний інструмент для управління майбутнім виробництва. Ми покажемо, як система забезпечує проактивне втручання, дозволяючи коригувати виробничий процес та запобігати фінансовим втратам ще до їхнього виникнення.

- оптимізація трудових ресурсів та економія витрат на ремонт і обслуговування.

Розроблена концепція стартапу «AgroTwin» демонструє практичне застосування цифрового двійника у промисловому масштабі. Стартап вирішує ключові проблеми управління виробництвом, контролю якості та переробки відходів. Запропонована бізнес-модель передбачає поетапне впровадження, отримання доказів ефективності та можливість масштабування на інші підприємства машинобудівної галузі. Реалізація цього стартапу забезпечує підвищення продуктивності, конкурентоспроможності та технологічної незалежності підприємства.

Таким чином, проєкт демонструє комплексний підхід до модернізації виробництва сільськогосподарської техніки через інтеграцію кібер-фізичних систем, цифрових двійників та інтелектуальних платформ. Впровадження запропонованих рішень дозволяє не тільки підвищити ефективність та економічну вигоду, а й створює умови для сталого розвитку підприємства, інтеграції новітніх технологій та формування конкурентних переваг у сучасному машинобудівному секторі.

Проєкт є наочним прикладом того, як сучасні інформаційні та кібер-фізичні технології можуть трансформувати виробничі процеси, створюючи смартпідприємство майбутнього, готове до цифрової економіки та інноваційного розвитку.

Кузьмін та ін. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 372 с

21. Тенденції розвитку машинобудування : навчальний посібник / Г.П. Кремнєв, В.М. Колеснік, Ф.В. Новіков, В.О. Жовтобрюх. – Одеса : Екологія, 2025. – 142 с.

22. Кодра Ю. В., Стоцько З. А. Контрольно-вимірювальні пристрої технологічних машин: Навч. посібник / За ред. З. А. Стоцька. — Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. — 312 с.

23. Голембо В., Бочкарьов О. Підходи до побудови концептуальних моделей кіберфізичних систем. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. - Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. № 864. С. 168-178.

24. Аулін В.В., Гриньків А.В., Ляшук О.Л., Великодний Д.О. Принципові основи організації та вдосконалення системи технічного сервісу транспортних машин. Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с-х машин і знарядь: збірник тез V Всеукраїнської науково-практичної конференції, 28-29 березня 2019 р. Житомир: Житомирський агротехнічний коледж, 2019. С. 245-248.

25. Ван Чунжі, Яцишин С. П., Лиса О. В., Мідик А.-В. В. Кіберфізичні системи та їх програмне забезпечення. Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник. ISSN 2664-262X Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, 2020, Col.3(34) 338 Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2018. Том 79. № 1. С. 34-38.

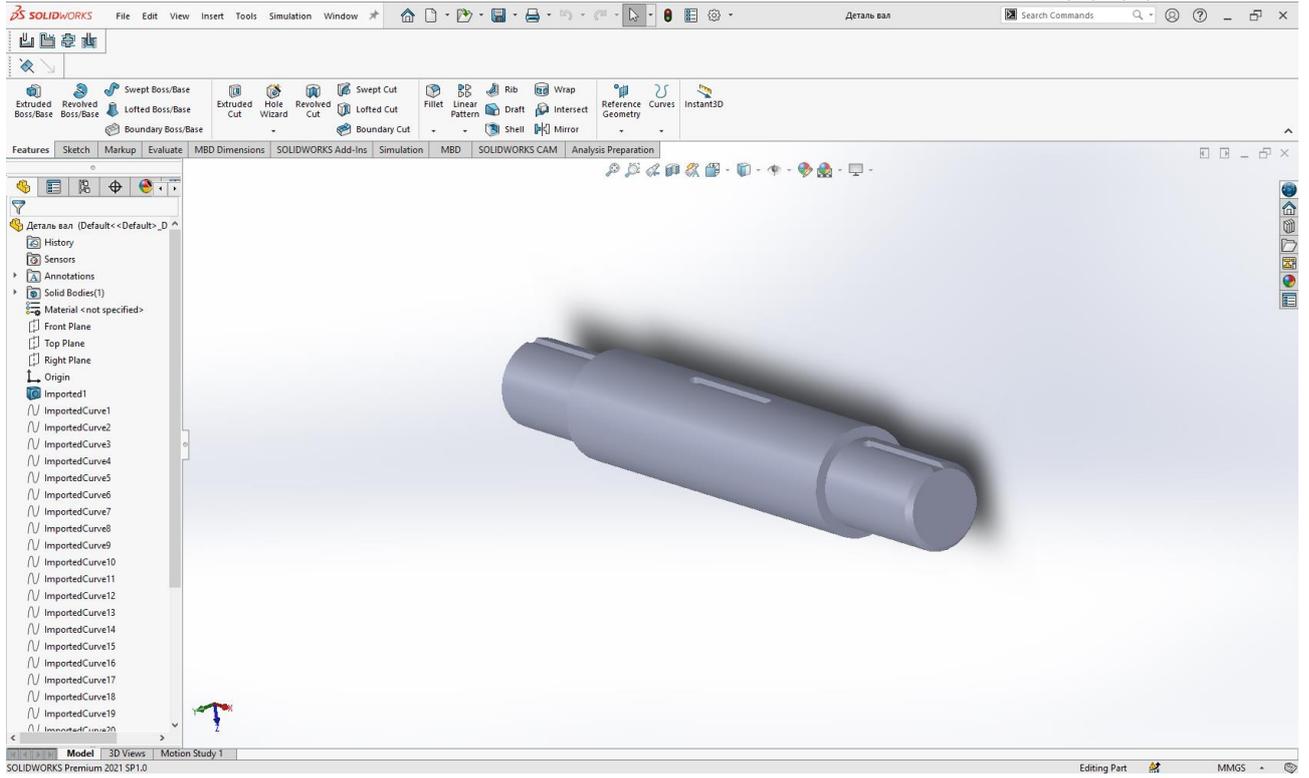
26. Мейтус В. Ю., Морозова Г. І, Таран Л. Ю., Козлова В. П., Майданюк Н. В. Кіберфізичні системи ж основа інтелектуалізації "Розумних" підприємств. Управляющие системы и машины. 2019. №4. С.14-26.

27. Аулін В.В., Гриньків А.В. Теоретичний аналіз діагностичних параметрів технічного стану систем та агрегатів засобів транспорту за допомогою методів теорії чутливості. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. 2017. Вип.

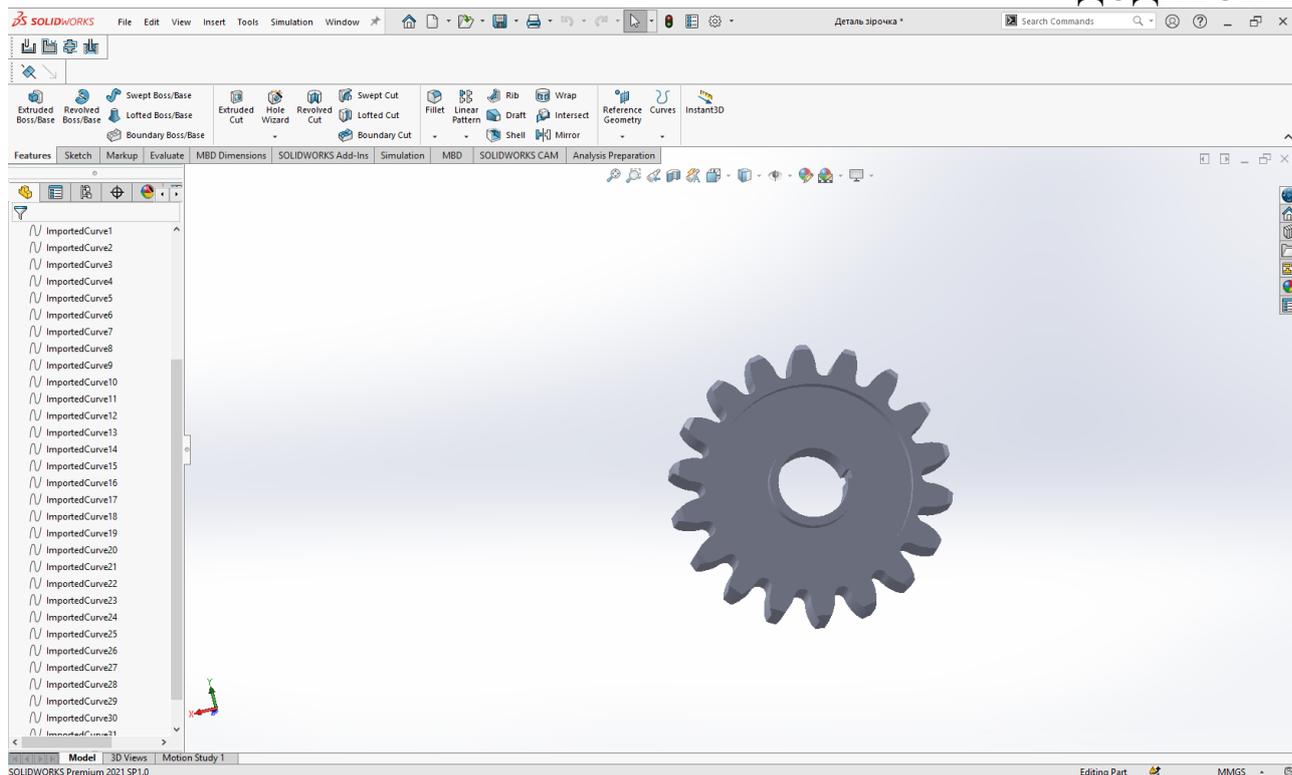
					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Изм..I	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		83

ДОДАТКИ

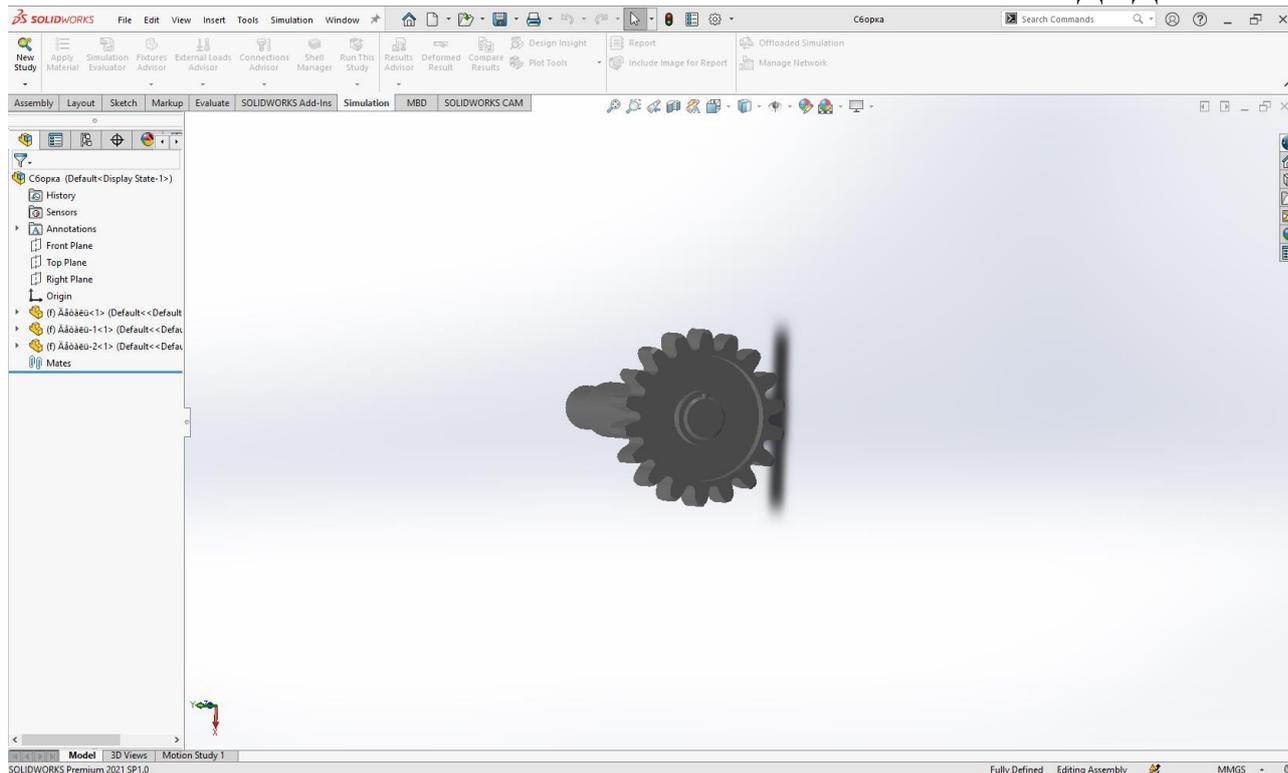
					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк. А
Ізм.../	Арк. А	№ докум. №	Підпис/Пі	Дата		85



					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм...І	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		86



					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм...І	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		87



					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм...І	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		88

Схема повного виробничого циклу підприємства з інтегрованим цифровим двійником



Ізм..I	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата

Стандарти та нормативні документи

1. **ГОСТ 1050-2013** – Сталі конструкційні звичайні і леговані. Технічні умови.
 - **ДСТУ 7809:2015** – Прокат сортовий, калібрований зі спеціальною обробкою поверхні зі вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови.
2. **ГОСТ 8732-78** – Труби сталеві холоднотягнені та гарячекатані.
 - **ДСТУ 4121:2022** – Метали чорні вторинні. Загальні технічні умови.
3. **ГОСТ 4543-71** – Сталі леговані інструментальні та їх хімічний склад.
 - **ДСТУ Б В.2.6-199:2014** – Конструкції сталеві будівельні. Вимоги до виготовлення.
4. **ГОСТ 19281-2014** – Чавун сірий. Технічні умови.
 - **ДСТУ Б В.2.6-200:2014** – Конструкції металеві будівельні. Вимоги до монтажу.
5. **ГОСТ 26183-84** – Верстати металорізальні. Загальні технічні вимоги.
6. **ГОСТ 24454-80** – Вимоги до точності та обробки деталей металорізальних верстатів.
7. **ГОСТ 12.2.003-91** – Машини металорізальні. Вимоги безпеки.
8. **ГОСТ Р 56587-2015** – Цифрові технології в машинобудуванні. Вимоги до моделювання.
9. **ISO 23247-1:2021** – Digital twin framework for manufacturing.

					ХНТУ 131-01-2025 ПЗ	Арк.А
Ізм../	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата		91