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: «Проєкт смартпідприємства енергетичного машинобудування»

Пояснювальна записка

Виконав: студент 2 курсу, групи 6ПМ
Спеціальності 131-Прикладна механіка
(шифр і назва спеціальності)
Гончар В.В
(прізвище та ініціали)
Керівник Дмитрієв Д.О.
(прізвище та ініціали)
Рецензент Русанов С.А.
(прізвище та ініціали)

Хмельницький – 2025

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
- Напрям підготовки
- Спеціальність 131- Прикладна механіка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, голова циклової комісії

Сєліверстов І.А.

«06» вересні 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Гончар Віктор Вікторович

1. Тема проекту «Проєкт смартпідприємства енергетичного машинобудування».

Керівник проекту (роботи) Дмитрієв Дмитро Олексійович

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

Затвердженні наказом вищого навчального закладу від 28.08.2025 року № 373-с.

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15.01.2025

3. Вихідні дані по проекту (роботи) Структура Проєкт смартпідприємства енергетичного машинобудування, типовий технологічний процесс, опис обладнання, контрольно-вимірювальних засоби, система комп'ютеризації та диспетчеризації підприємства.

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
Теоретичні основи та аналіз вихідного стану виробництва	Дмитрієв Д.О.	06.09.24	06.09.24
Розробка базової симуляційної моделі в середовищі tecnomatix plant simulation	Дмитрієв Д.О.	20.09.24	20.09.24
Проектування модернізованої виробничої системи	Дмитрієв Д.О.	07.10.24	07.10.24
Комплексний аналіз ефективності впровадження	Дмитрієв Д.О.	21.10.24	21.10.24
Розробка стартап проєкту	Кузнєцов С.І.	28.10.24	28.10.24

Дата видачі завдання 06.09.24

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної Роботи	Срок виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір і огляд літератури	20.09.24	20.09.24
2	Методи досліджень, математичні моделі, апаратне забезпеченя	07.10.24	
3	Проектування елементів Смартсистема виробництва, структура та опис цифрових двійників технологічних процесів	21.10.24	
4	Розділ організації виробництва та диспетчерські засоби та оцінка KPI виробництва по ДСТУ22400	25.11.24	
5	Розділ з розробки стартап проєкту	29.11.24	
6	Оформлення ПЗ і плакатів	13.12.24	
7	Завершення оформлення проекту	15.12.24	

Студент _____ Гончар В.В.

(підпис) (призвище та ініціали)

Керівник роботи _____Дмитрієв Д.О.

(підпис) (призввище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ 7

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ ВИХІДНОГО СТАНУ ВИРОБНИЦТВА 10

1.1. Концепція Digital Twin як основа інтелектуального виробництва 10

1.2. Аналіз технологічного процесу виготовлення ротора парових турбін 14

1.3. Аналіз обладнання та виявлення «вузьких місць» у виробничому ланцюжку 22

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА БАЗОВОЇ СИМУЛЯЦІЙНОЇ МОДЕЛІ В СЕРЕДОВИЩІ TECNOMATIX PLANT SIMULATION 29

2.1. Створення та налаштування імітаційної моделі існуючого виробництва 29

2.2. Валідація моделі та збір вихідної статистики ефективності 33

РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ ВИРОБНИЧОЇ СИСТЕМИ 36

3.1. Обґрунтування напрямів модернізації та вибору обладнання 36

3.2. Розробка цифрового двійника модернізованої виробничої дільниці 41

3.3. Інтеграція роботизованих рішень у віртуальне середовище 43

3.4. Розробка технологічного процесу роботизованої комірки 46

3.5. Програмування робота в середовищі ABB RobotStudio 48

52

РОЗДІЛ 4. КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ

4.1. Порівняльний аналіз ключових показників ефективності (KPI) 52

4.2. Аналіз продуктивності 54

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ 56

5.1. Концепція стартап-проєкту та його унікальна торговельна пропозиція 56

5.2. Аналіз ринку та цільової аудиторії 59

5.3. Бізнес-модель та фінансове планування 61

5.4. План впровадження та етапи розробки 62

5.5. Оцінка ризиків та шляхи їх мінімізації 64

Висновки по проєкту 68

Перелік джерел посилання 71

Додаток А 74

ВСТУП

Сучасний стан економіки та промисловості України вимагає від підприємств, зокрема в галузі енергетичного машинобудування, швидкої адаптації до змін, підвищення ефективності та конкурентоспроможності. Глобальні тренди Четвертої промислової революції (Індустрія 4.0) вказують на цифровізацію як на ключовий шлях досягнення цих цілей. Однією з найперспективніших технологій в цьому контексті є концепція цифрового двійника (Digital Twin).

Цифровий двійник – це не просто 3D-модель, а динамічна, «жива» віртуальна копія фізичного об'єкта, системи або процесу, що синхронізується з ним за допомогою даних з датчиків та інших джерел. Він дозволяє проводити аналіз, моделювання, прогнозування та оптимізацію в реальному часі без втручання в реальний виробничий процес, знижуючи ризики та економлячи ресурси.

Для підприємств енергетичного машинобудування, продукція яких відрізняється високою складністю, матеріаломісткістю та довгим виробничим циклом (наприклад, ротори парових турбін), впровадження Digital Twin є особливо актуальним. Воно дозволяє вирішувати такі проблеми, як неефективне використання обладнання, високий рівень незавершеного виробництва, довгі терміни виконання замовлень та складність планування.

Ступінь розробленості проблеми. Технологія Digital Twin активно досліджується та впроваджується світовими лідерами машинобудування, такими як Siemens, General Electric, ABB. В українському науковому та виробничому просторі ця тема знаходиться на початковій стадії розвитку, що зумовлює науковий інтерес та практичну цінність даного дослідження.

Мета роботи: комплексна смартизація підприємства енергетичного машинобудування за рахунок розробки цифрового двійника дільниці

виготовлення ротора парових турбін та обґрунтування економічної ефективності проекту її модернізації.

Для досягнення мети було поставлено наступні завдання:

1. Дослідити теоретичні основи концепції Digital Twin та проаналізувати існуючий технологічний процес виготовлення ротора.
2. Виявити технічні засоби, що мають потенціал для удосконалення технологічних процесів та проблемні зони у вихідному виробничому ланцюжку.
3. Розробити в середовищі Tecnomatix Plant Simulation базову симуляційну модель існуючого виробництва, провести її валідацію та збір вихідної статистики.
4. Обґруннувати напрями модернізації та вибір нового обладнання (робот-маніпулятор, токарно-фрезерний комплекс).
5. Створити на основі базової моделі цифровий двійник модернізованої дільниці з інтеграцією роботизованих рішень.
6. Провести порівняльний аналіз ефективності двох сценаріїв за ключовими показниками та розрахувати економічний ефект від запропонованих рішень.

Об'єкт дослідження: процес виготовлення ротора парових турбін на підприємстві енергетичного машинобудування.

Предмет дослідження: методи та засоби підвищення ефективности виробничого процесу шляхом впровадження технології Digital Twin та роботизації.

Наукова новизна полягає у комплексному підході до моделювання виробничого процесу ротора турбін з послідовним переходом від аналізу до

проектування з повним економічним обґрунтуванням в рамках одного дослідження.

Практична цінність: Результати роботи дозволяють прийняти обґрунтоване управлінське рішення щодо інвестування в модернізацію виробництва.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ ВИХІДНОГО СТАНУ ВИРОБНИЦТВА

1.1. Концепція Digital Twin як основа інтелектуального виробництва

Концепція Digital Twin останнім часом перетворилася з футуристичної ідеї на одну з ключових технологій Індустрії 4.0. Це поняття визначається як віртуальний динамічний прототип фізичного об'єкта, системи або процесу, який імітує його поведінку в реальному часі або з відстаненою синхронізацією [1].

Основою цифрового двійника є три взаємопов'язані компоненти:

1. **Фізичний об'єкт** у реальному світі.
2. **Віртуальна модель** у цифровому просторі.
3. **Двосторонній зв'язок** передачі даних між ними.

Функціональні можливості програмного забезпечення для моделювання в енергетичному машинобудуванні повинні включати [1]:

1. **Геометричне та фізичне моделювання** — здатність створювати точні 3D-моделі обладнання та систем, що відтворюють його фізичні властивості та динамічні характеристики. Це включає моделювання теплопередачі, динаміки рідин, вібрацій, навантажень та інших важливих процесів

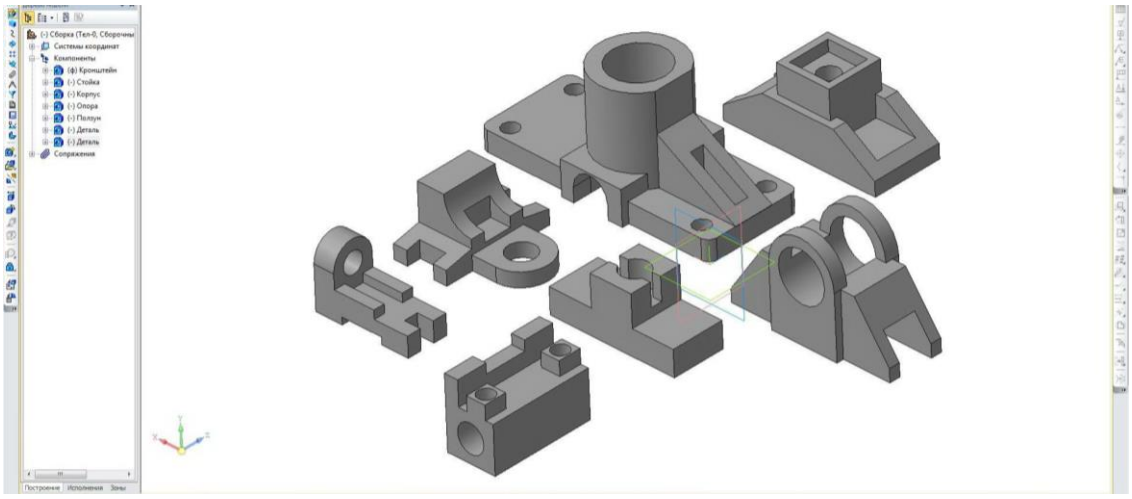


Рисунок 1.1 – Геометричне та фізичне моделювання

2. **Моделювання життєвого циклу обладнання** — важливою функцією є можливість проєктування та прогнозування всіх етапів життєвого циклу енергетичного обладнання: від початкового проєктування та виробництва до експлуатації, технічного обслуговування та утилізації. Це дозволяє підприємствам оцінювати ефективність обладнання протягом його експлуатації та планувати ресурси для ремонту та оновлення [2]

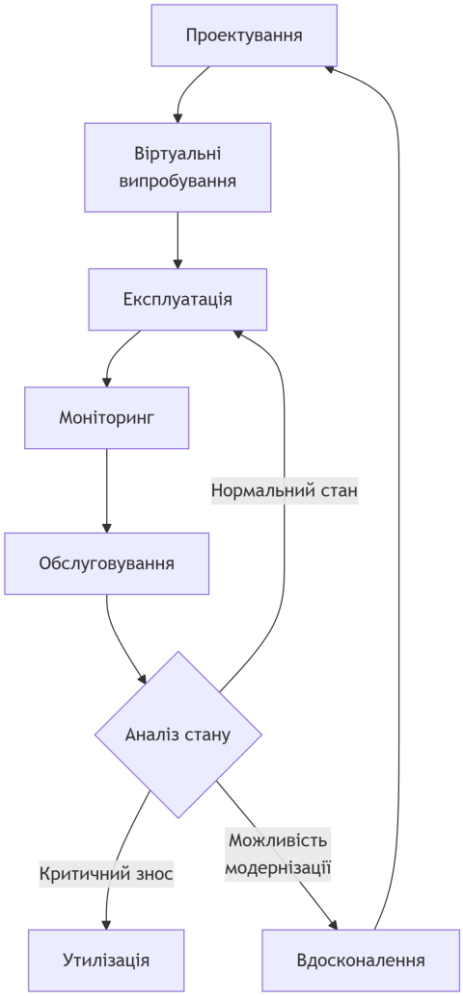


Схема 1. Моделювання життєвого циклу обладнання

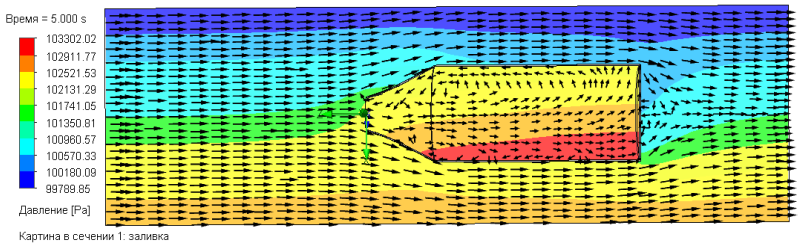
3. **Інтеграція з реальними виробничими даними** — для забезпечення точності моделювання та управління важливою є можливість інтеграції цифрового двійника з системами збору та обробки даних, зокрема з

Інтернетом речей (IoT), SCADA-системами та іншими системами контролю виробництва. Це дозволяє отримувати актуальні дані в режимі реального часу та на їх основі коригувати роботу моделі, виявляти потенційні проблеми та оптимізувати виробничі процеси[2]

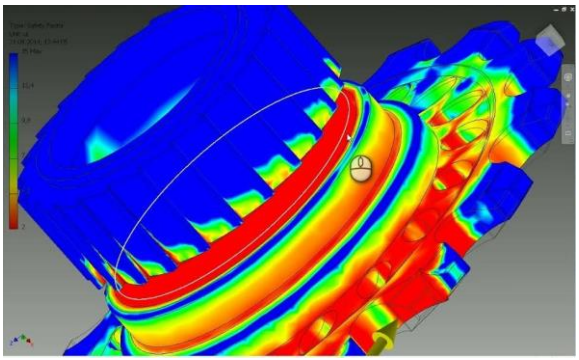
4. **Аналіз та оптимізація процесів** — програмні засоби для моделювання мають включати інструменти для аналізу ефективності виробничих процесів. Це включає аналіз енергоспоживання, виявлення вузьких місць у виробництві, прогнозування можливих відмов та розробку заходів щодо їх уникнення. Наприклад, цифровий двійник може передбачати, коли обладнання потребуватиме технічного обслуговування, завдяки аналізу даних з датчиків та моделюванню сценаріїв експлуатації.
5. **Моделювання сценаріїв** — у межах цифрового двійника можливе моделювання різних сценаріїв роботи обладнання. Це дозволяє прогнозувати, як певне обладнання або процес буде функціонувати в різних умовах: при зміні навантаження, умов довкілля, ресурсів тощо[3].
6. **Інтеграція з інформаційними системами підприємства** — важливою функцією є інтеграція цифрового двійника з ERP-системами, системами управління технічним обслуговуванням (CMMS) та іншими бізнес-системами підприємства. Це дозволяє отримувати актуальну інформацію про виробничі ресурси, управління запасами, планування ремонтів та іншими процесами, що прямо впливають на ефективність роботи підприємства. [3]

Для створення ефективного Digital Twin виробничої системи необхідне використання спеціалізованого програмного забезпечення, серед якого лідируючі позиції займають такі продукти, як SolidWorks Flow Simulation,

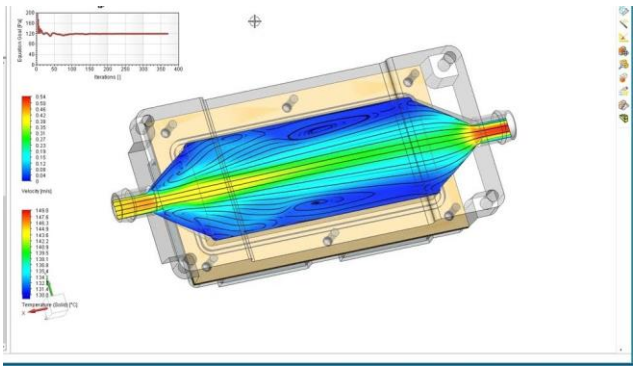
Autodesk Inventor, Siemens NX. Дані платформи дозволяють створювати дискретні події моделі, що враховують виробничі процеси, обмеженість ресурсів та складну логіку взаємодії між елементами системи. [4]



а) Моделювання потоків пари в проточній частині турбіни за допомогою SolidWorks Flow Simulation



б) Аналіз напружень у шестерні турбіни методом скінченних елементів у Autodesk Inventor



в) Інтегроване моделювання потоку та термонапружень у проточній частині в Siemens NX

Рисунок 1.2 – а),б),в) - Приклади програмного забезпечення для моделювання в енергетичному машинобудуванні

Реалізація Digital Twin на підприємстві енергетичного машинобудування відкриває наступні можливості:

- **Оптимізація виробничих потоків:** Виявлення та усунення «вузьких місць», зменшення часу простою обладнання, зниження обсягів незавершеного виробництва.
- **Віртуальне тестування та валідація:** Можливість без ризиків для реального виробництва перевірити ефективність нових технологічних процесів, планів виробництва або робочих графіків.
- **Предиктивне обслуговування:** Моделювання зношування обладнання на основі даних про його навантаження дозволяє планувати ремонти до моменту виходу з ладу, знижуючи вартість ремонту та запобігаючи простоям.
- **Підвищення якості продукції:** Аналіз впливу різних факторів виробничого процесу на кінцеву якість виробу.

Таким чином, Digital Twin виступає не як ізольований інструмент, а як системне рішення, що інтегрує в собі дані з рівнів автоматизації (SCADA, MES), проектування (CAD/CAE/CAM) та корпоративного управління (ERP), забезпечуючи цілісний погляд на виробництво[4].

1.2. Аналіз технологічного процесу виготовлення ротора парових турбін

Ротори парових турбін є критично важливими компонентами, що працюють в екстремальних умовах, що визначають високу складність їх проектування та вимоги до матеріалів. Конструкція ротора безпосередньо впливає на ККД, потужність та надійність всієї турбіни[5]

Основні фактори навантаження та їх наслідки:

1. **Високі механічні навантаження:**
    - **Джерела:** Центробіжні сили, що зростають пропорційно квадрату кутової швидкості, а також згинальні моменти від нерівномірного теплового розширення та тиску пари.
    - **Приклад:** Для ротора потужної турбіни, що обертається зі швидкістю 3000 об/хв (50 Гц) та має діаметр ротора 1.2 м, напруження від центробіжних сил у тілі ротора можуть досягати сотень МПа.
    - **Наслідок:** Ризик втомного руйнування, пластичної деформації та виникнення тріщин.
2. **Високі температури:**
    - **Джерела:** Контакт з перегрітою парою, температура якої в сучасних установках може перевищувати 600°C (а в перспективних проектах — сягати 700°C і більше).
    - **Приклад:** У циліндрі високого тиску (ЦВТ) парової турбіни ротор постійно працює в умовах, коли матеріал наближається до межі своєї жаростійкості.
    - **Наслідок:**
        - **Повзучість:** Повільна пластична деформація матеріалу під дією постійного навантаження при високій температурі, що може призвести до витягування та прогину ротора.
        - **Втрата міцності:** Зниження механічних характеристик (границі плинності, міцності) з нагріванням.
3. **Високі швидкості обертання:**
    - **Джерело:** Потреба у високій швидкості для ефективного перетворення енергії пари на механічну роботу.

- **Приклад:** Критичні швидкості ротора, при яких виникають різкі зростання вібрацій через резонанс. Конструкція повинна бути розрахована так, щоб робоча швидкість не співпадала з критичними.
- **Наслідок:** Динамічна нестійкість, вібрації, можливість контакту ротора зі статором (затирання), що призводить до катастрофічного руйнування.

Для забезпечення надійності та довговічності необхідно проводити комплексне моделювання напружено-деформованого стану роторів. Комбінована дія високих температур, механічних навантажень та швидкостей обертання вимагає використання сучасних методів CAE-аналізу. [5]

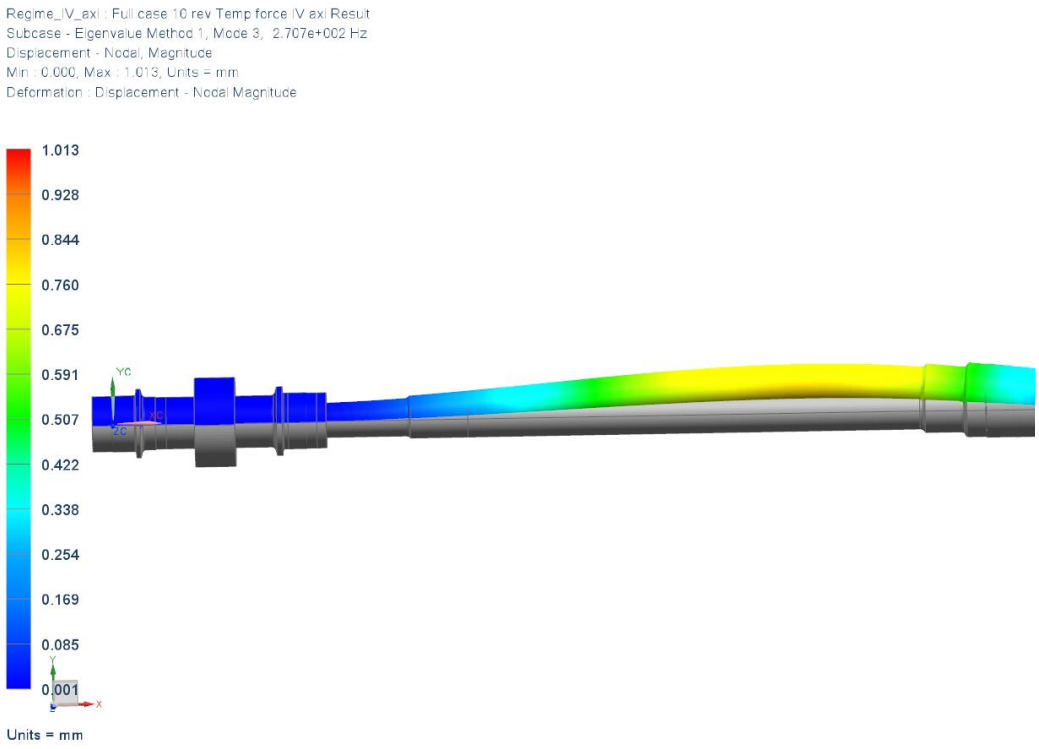


Рисунок 1.3 – Результат комбінованого термо-механічного аналізу ротора парової турбіни: розподіл еквівалентних напружень (за Мізесом) з урахуванням центробіжних сил та нагріву (ANSYS Mechanical)

Як демонструють результати моделювання на Рисунку 1.3, зони геометричних концентраторів напружень — галтелі та радіусні канавки — є осередками виникнення підвищених напружень. Це явище обумовлено різкою зміною жорсткості конструкції в цих місцях, що призводить до формування несприятливих напружених станів при дії крутного моменту, термічних навантажень та центробіжних сил. Такі концентратори напружень істотно знижують втомну міцність конструкції, оскільки саме в цих зонах ініціюються тріщини втоми, здатні поширюватись при циклічному навантаженні. Тому, для запобігання втомного руйнування, критично важливими є не лише ретельне проєктування форми цих відповідальних ділянок, а й оптимізація технологічних процесів їх обробки для досягнення мінімальної шорсткості поверхні та усунення мікродефектів.

Аналіз конструкції та технологічних вимог до виготовлення приводних роторів парових турбін моделі К-300-23 (рис.1.4.) дозволяє виявити, що основна частина технічних умов зосереджена на забезпеченні високої точності обробки, необхідних механічних властивостей матеріалу та геометричної стабільності критичних елементів.

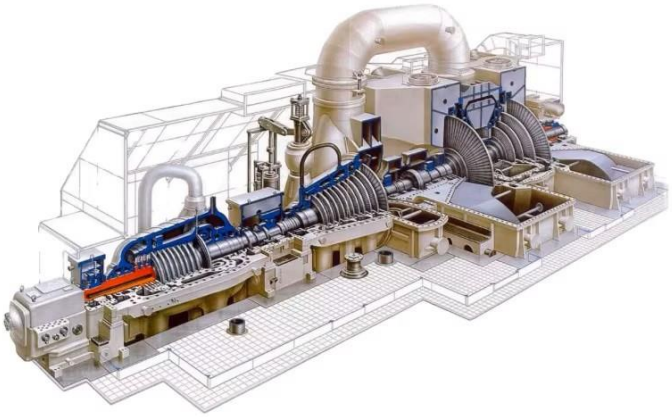
Зокрема, до таких вимог належать:

1. **Вимоги до точності обробки та шорсткості поверхонь:**
    - Посадкові поверхні під підшипники ковзання мають поле допуску на рівні h6 або h5 (що відповідає ~5-11 мкм для номінальних діаметрів ротора) та шорсткість Ra 0,4...0,8 мкм для забезпечення стабільної масляної плівки та запобігання зношуванню.
    - Поверхні лабіринтових ущільнь обробляються з полем допуску f7 та шорсткістю Ra 0,8...1,6 мкм для мінімізації витоку пари.

- Шліцеві з'єднання, що передають крутний момент, вимагають високої точності за стандартом (наприклад, D-4 за ГОСТ 6033-80) з шорсткістю бокових поверхонь шліців Ra 0,8...1,6 мкм.

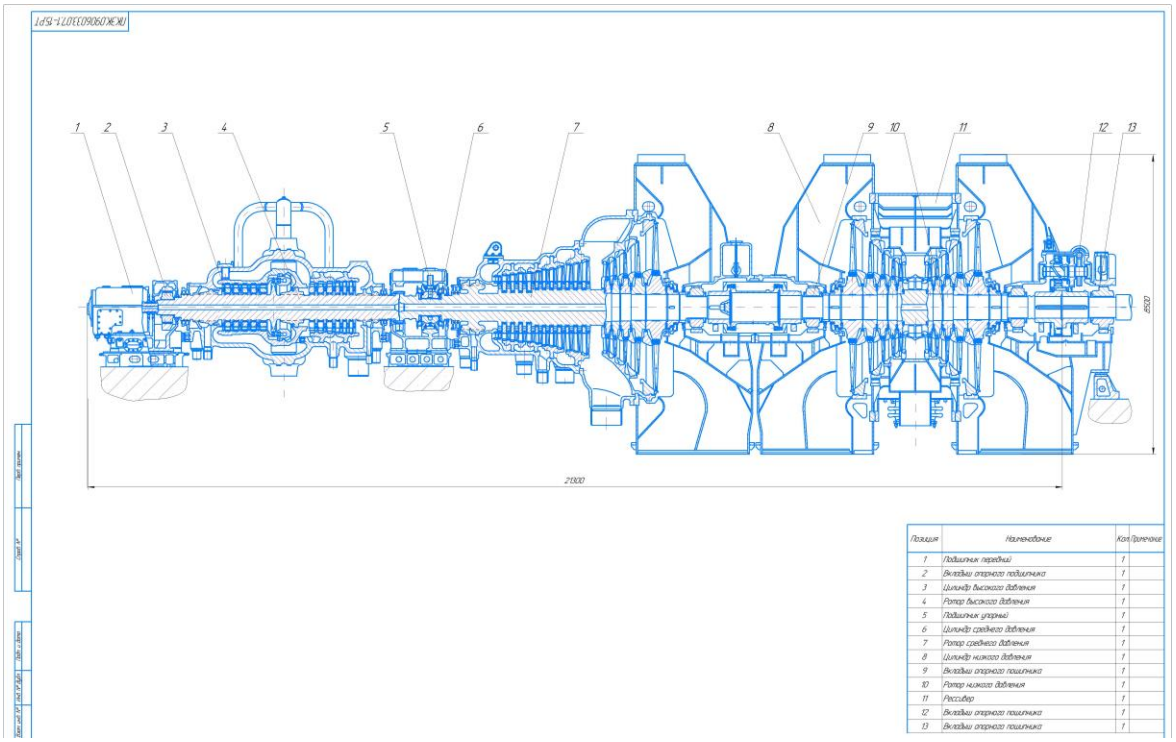
2. **Вимоги до механічних властивостей матеріалу:**
   - Механічні властивості поковки ротора (як правило, з легованої сталі марки 25Х1М1Ф або аналогічної) повинні забезпечувати:
   - Твердість по Брінеллю в межах НВ 241...285.
   - Межа плинності не менше $\sigma_т$ = 450 МПа.
   - Межа міцності не менше $\sigma_в$ = 630 МПа.
   - Ударна в'язкість (KCU) не нижче 50 Дж/см² при кімнатній температурі для запобігання крихкому руйнуванню.
   - Границя витривалості (втомна міцність) при симетричному циклі навантаження повинна становити не менше σ^{-1} = 250...300 МПа для забезпечення ресурсу понад 10^7 циклів до руйнування.
3. **Вимоги до геометричної точності (допуски розташування та форми):**
   - Радіальне биття цапф під підшипники не повинно перевищувати 0,02...0,03 мм.
   - Торцеве биття буртів та упорних поверхонь обмежується значенням 0,03...0,05 мм.
   - Відхилення від круглості (овальність, огранка) критичних діаметрів (цапф, ділянки лабіринтів) допускається в межах 0,01...0,02 мм.
   - Співвісність всіх ступенів робочих коліс та цапф підшипників має бути в межах 0,05 мм по всій довжині ротора.

Технологічний процес їх виготовлення є багатоопераційним, складним та вимагає використання високоточного обладнання. [5]



а) 3Д модель парової турбінної установки К-300-23

б) – загальний вигляд в експлуатації;



в) – складальне креслення

Рисунок 1.4 – а),б),в). Конструкція ротора парових турбін

Детальний аналіз існуючого техпроцесу дозволяє формалізувати його для подальшого моделювання. Розглянемо типовий маршрут обробки ротора:

Таблиця 1. Деталізований технологічний маршрут виготовлення ротора парової турбіни

№	Назва операції	Обладнання (модель)	Нормований час операції, год.	Час переналади, год.	Примітки
1	Вхідний контроль заготовки	Контрольний стенд	0.5	-	

№	Назва операції	Обладнання (модель)	Нормований час операції, год.	Час переналади, год.	Примітки
2	Термічна обробка (гартування)	Піч ПТ-63М	6.0	1.0	Включає час нагріву та витримки
3	Чорнове точіння	Токарний верстат 1А660	4.5	0.5	Зняття основного припуску
4	Фрезерування шпонкових пазів	Фрезерний верстат 6Р13Ф3	3.0	0.7	Висока точність вимог
5	Чистове точіння	Токарний верстат 1А660	5.0	0.5	Досягнення квалітету точності
6	Фінішне шліфування	Шліфувальний верстат М1380	8.0	1.0	Забезпечення високої чистоти поверхні
7	Динамічне балансування	Верстат PHW-5000	2.5	0.8	Критична операція для подальшої експлуатації
8	Фінальний контроль та	Контрольний стенд	1.0	-	

№	Назва операції	Обладнання (модель)	Нормований час операції, год.	Час переналади, год.	Примітки
	пакування				

Як видно з таблиці, техпроцес є послідовно-паралельним, оскільки після термічної обробки заготовка може надходити на різні верстати залежно від завантаженості. Однак, логістика між дільницями залишається неформалізованою та залежить від людського фактора.

Ключові вимоги до процесу:

- **Точність:** Дотримання допусків у межах 0.01-0.002 мм на критичних ділянках (посадкові шийки під підшипники).
- **Якість поверхні:** Висока чистота обробки після шліфування для зниження втомного зношування.
- **Відсутність залишкових напружень:** Правильно проведена термічна обробка для запобігання деформацій під час експлуатації.
- **Динамічна збалансованість:** Зведення до мінімуму дисбалансу, що є запорукою безвібраційної роботи турбіни на високих швидкостях.

1.3. Аналіз обладнання та виявлення «вузьких місць» у виробничому ланцюжку

На основі деталізованого технологічного маршруту було проведено аналіз існуючого парку обладнання дільниці виготовлення ротора. Критично важливим етапом було не лише перерахування верстатів, а й оцінка їх фактичної завантаженості, що дозволяє кількісно оцінити ефективність виробничої системи в цілому [6].

Для попередньої оцінки ефективності використання обладнання було проведено розрахунок його теоретичного коефіцієнта завантаження (Кз) за формулою:

$$K_з = \frac{T_{норм}}{F_{еф}} \times N$$

Де:

- **Тнорм** – сумарне нормоване час обробки однієї деталі на верстаті, годин;
- **Феф** – ефективний фонд робочого часу верстата за розрахунковий період (приймемо 1 місяць = 22 робочих дні × 8 год × 2 зміни = 352 год);

N – плановий випуск продукції за розрахунковий період (приймемо 16 ротора/місяць, виходячи з історичних даних).

Таблиця 2. Попередній аналіз завантаженості обладнання

Обладнання	Норм. час на 1 шт., год.	Заг. час на прогр., год. (Тнорм × N)	Теоретич. Кз, %	Примітки
Піч ПТ-63М	6.0	96.0	**27.3%**	Низька завантаж., але операція довга, створює чергу з заготовок.
Токарний верстат 1А660	9.5 (4.5+5.0)	152.0	**43.2%**	**Критичний елемент.** Сумарний час найбільший, верстат працює у 2 зміни.
Фрезерний	3.0	48.0	**13.6%**	Низька завантаж., але

Обладнання	Норм. час на 1 шт., год.	Заг. час на прогр., год. (Тнорм × N)	Теоретич. Кз, %	Примітки
верстат 6Р13Ф3				єдинений для даної операції, може бути «вузьким місцем».
Шліфувальний верстат М1380	8.0	128.0	**36.4%**	Середня завантаж., працює стабільно.
Балансувальний верстат PHW-5000	2.5	40.0	**11.4%**	Низька завантаж.

Токарно-винторізний верстат 1А660

Рисунок 1.5 – Токарно-винторізний верстат 1А660

Технічні характеристики:

- Максимальний діаметр обробки над станиною: 1000 мм.
- Максимальний діаметр обробки над супортом: 630 мм.
- Довжина обробки: до 6000 мм (існують модифікації для довжини до 10 000 мм).

- Максимальна вага деталі: до 12 тонн.
- Діапазон швидкостей шпинделя: від 2 до 800 об/хв.
- Привод шпинделя: 30 кВт.
- Точність обробки: до 0,01 мм.

Особливості:

Верстат 1А660 широко використовується в машинобудуванні для обробки великих і важких деталей, таких як вали турбін, ротори генераторів, труби великих діаметрів та інші габаритні елементи. Завдяки високій точності, він підходить як для чорнової, так і для фінішної обробки [7].

Фрезерний верстат 6Р13Ф3

Рисунок 1.6 – Фрезерний верстат 6Р13Ф3

Призначення: Фрезерна обробка посадкових поверхонь роторів паротурбін.

Технічні характеристики:

- Максимальний діаметр обробки: до 800 мм.
- Довжина обробки: до 3000 мм.
- Точність позиціонування: до 0,01 мм.
- Максимальна швидкість шпинделя: до 3200 об/хв.
- Привод шпинделя: 30 кВт.

Особливості: Верстат забезпечує точну обробку посадкових поверхонь під підшипники та інші критичні компоненти турбіни. Висока продуктивність і можливість обробки великих деталей роблять його одним із основних верстатів на виробничих ділянках підприємств енергетичного машинобудування[8]

Циліндричний шліфувальний верстат М1380

Рисунок 1.7 – Циліндричний шліфувальний верстат М1380

Циліндричний шліфувальний верстат М1380 призначений для обробки зовнішніх циліндричних і конічних поверхонь заготовок великого розміру та маси, таких як вали паротурбін, ротори та інші подібні деталі. Він використовується для фінішної обробки деталей з високими вимогами до точності та якості поверхні

Технічні характеристики:

- Максимальний діаметр обробки: до 800 мм.
- Довжина обробки: до 5000 мм.
- Максимальна вага деталі: до 5 тонн.
- Точність обробки: до 0,002 мм.
- Швидкість обертання шпинделя: до 100 об/хв.
- Швидкість обертання шліфувального круга: до 1600 об/хв.
- Потужність привода шпинделя: 15 кВт.
- Потужність привода шліфувального круга: 30 кВт.

Особливості:

Система автоматичного контролю параметрів шліфування дозволяє досягти високої якості обробки поверхонь, що важливо для деталей, що контактують з підшипниками та іншими компонентами. Оснащений системою охолодження для запобігання перегріву під час шліфування, що забезпечує стабільність обробки та якість поверхні[9]

Термічна піч ПТ-63М

Рисунок 1.8 – Термічна піч ПТ-63М

Призначення: Термічна обробка роторі паротурбін, зокрема гартування та відпуск.

Технічні характеристики:

- Максимальна робоча температура: до 1250°C.
- Максимальна вага деталі: до 15 тонн.
- Об'єм камери: 1500 x 4000 мм.
- Точність контролю температури: ±3°C.
- Атмосфера: повітря або інертні гази (аргон, азот).

Особливості: Піч забезпечує рівномірний розподіл температури по всій довжині ротору, що дозволяє уникати появи внутрішніх дефектів і зберігати механічні властивості металу[10]

Балансувальний верстат PHW-5000

Рисунок 1.9 – Балансировочний станок PHW-5000

Призначення:

Балансировочний станок призначений для статичного та динамічного балансування роторів великих розмірів, таких як ротори турбін, роторів насосів, компресорів та інших обертових деталей. Він забезпечує високу точність балансування, що є критично важливим для запобігання вібраціям, зносу підшипників та інших небажаних явищ.

Технічні характеристики:

- Максимальний діаметр оброблюваного вала: до 1000 мм.
- Максимальна довжина оброблюваного вала: до 6000 мм.
- Максимальна вага деталі: до 8 тонн.
- Точність балансування: до 0,5 г·мм/кг (залежно від конфігурації та типу вала).
- Швидкість обертання вала під час балансування: від 50 до 3000 об/хв (регульована).
- Потужність привода: 20 кВт.

- Система вимірювання дисбалансу: цифрова, з інтегрованим програмним забезпеченням для аналізу та корекції[11]

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА БАЗОВОЇ СИМУЛЯЦІЙНОЇ МОДЕЛІ В СЕРЕДОВИЩІ TECNOMATIX PLANT SIMULATION

2.1. Створення та налаштування імітаційної моделі існуючого виробництва

Метою даного етапу було створення віртуального прототипу виробничої системи у стані, який би максимально точно відображав реальний процес. Для цього було використано середовище Siemens Tecnomatix Plant Simulation 2202.

Перед створенням симуляційної моделі необхідно ретельно проаналізувати функціональні вимоги та характеристики автоматизованої лінії. Цей етап відіграє вирішальну роль у підготовці до подальших кроків. Вимоги включають у себе такі параметри, як швидкість обробки, обсяг виробництва, технічні обмеження обладнання, а також особливості процесу виробництва.

Аналіз функціональних вимог дозволяє зрозуміти усі аспекти виробництва, починаючи від природи входу матеріалу та закінчуючи виходом готової продукції. Важливо врахувати всі можливі варіанти обробки матеріалу, розміщення обладнання, часові обмеження та потенційні проблеми, які можуть виникнути на різних етапах виробництва.

Після завершення аналізу функціональних вимог переходимо до створення симуляційної моделі в програмі Tecnomatix Plant Simulation. Це комплексний процес, який вимагає детального розуміння принципів роботи автоматизованої лінії та вміння ефективно відтворювати їх у віртуальному середовищі [12].

Етапи моделювання:

1. **Створення структури моделі:** Розроблена ієрархічна структура об'єктів, що включає:
    - Source (Джерело) – генератор заготовок ротора з інтервалом, що відповідає плановому випуску.
    - Station (Станції) – об'єкти, що моделюють робочі центри (верстати). Кожній станції присвоєно ім'я відповідного верстата.
    - Buffer (Буфери) – черги перед верстатами для моделювання незавершеного виробництва (WIP).
    - WorkerPool, Broker – для моделювання роботи операторів та логістиків.
    - Drain (Стік) – фінальна точка для готових ротора.
2. **Налаштування параметрів об'єктів:** Для кожної станції були задані параметри, взяті з Таблиці 2:

Час обробки: Задано не фіксованим значенням, а за нормальним розподілом (Normal Distribution) з математичним сподіванням, рівним нормованому часу, та стандартним відхиленням 10%. Наприклад, для токарного верстата: normal(4.5, 0.45).

Час переналадки: Задано для кожної станції відповідно до техпроцесу.

Графік роботи: Для всіх верстатів встановлено двозмінний графік роботи (16 годин на добу) з врахуванням планових профілактичних оглядів.

3. **Моделювання логістики:** Переміщення заготовок між станціями було реалізовано за допомогою об'єктів Transporter та Track. Швидкість переміщення та час на завантаження/розвантаження задані на основі хронометражу реальних операцій.

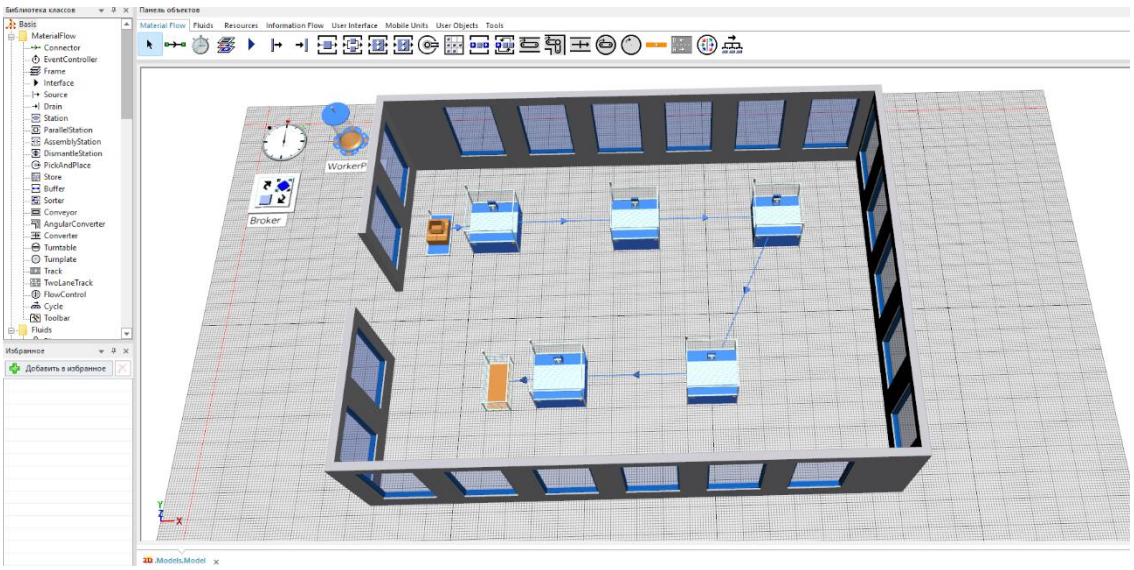
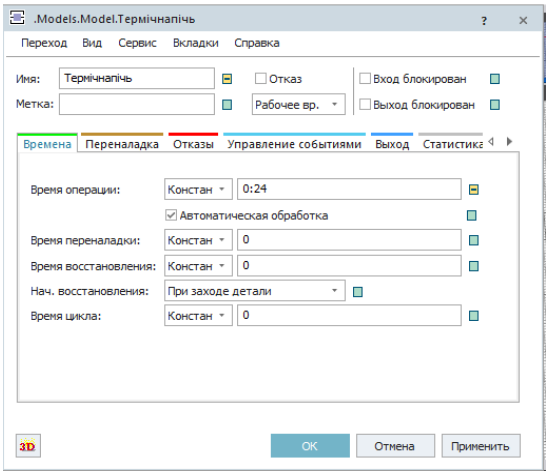


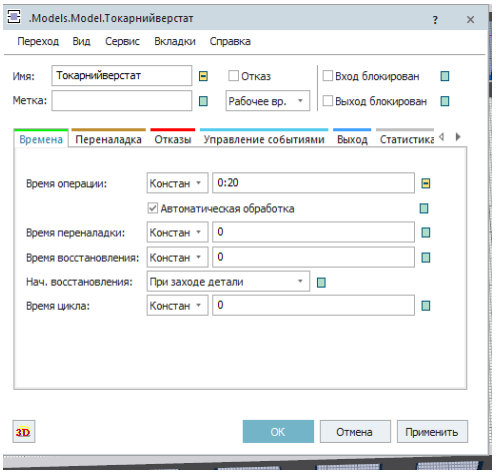
Рисунок 2.1 – Базова імітаційна модель виробничої дільниці в Tecnomatix Plant Simulation

Опис моделі: На моделі чітко видно послідовність операцій, шляхи переміщення заготовок. Починаючи з етапу термічної обробки заготовок, яка включає гартування і відпуск для покращення міцності та зносостійкості металу. Після цього, на токарних і фрезерних верстатах виконується чорнова і чистова механічна обробка для придання базових розмірів і форм деталі. Наступним етапом є шліфувальна обробка, яка здійснюється на спеціалізованих верстатах для точного виготовлення та забезпечення відповідності допускам. Потім вал проходить динамічне балансування для уникнення вібрацій під час експлуатації. На завершальному етапі відбувається фінальна збірка вала, після чого він готовий до встановлення у парову турбіну або подальшої інтеграції з іншими компонентами.

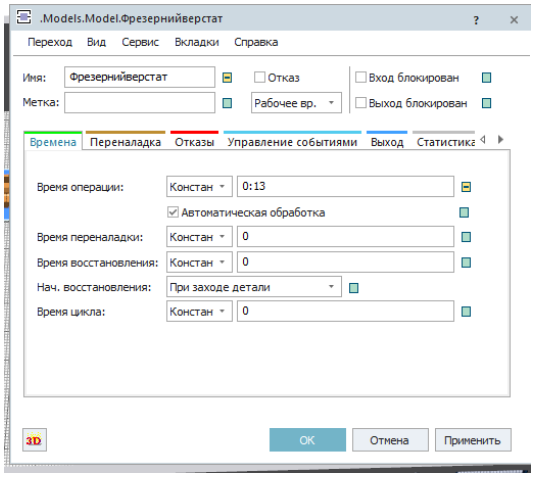
Під час створення симуляційної моделі велика увага приділяється візуалізації результатів. За допомогою анімаційних моделей можна відтворити роботу автоматизованої лінії в реальному часі, що допомагає зрозуміти динаміку виробництва та виявити можливі проблеми рис.2.2.



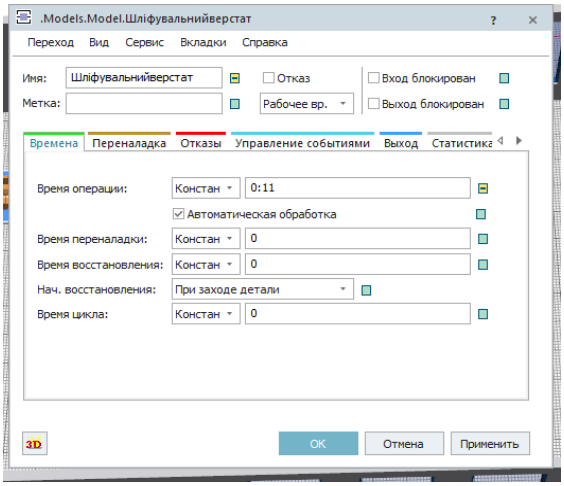
Термічна піч



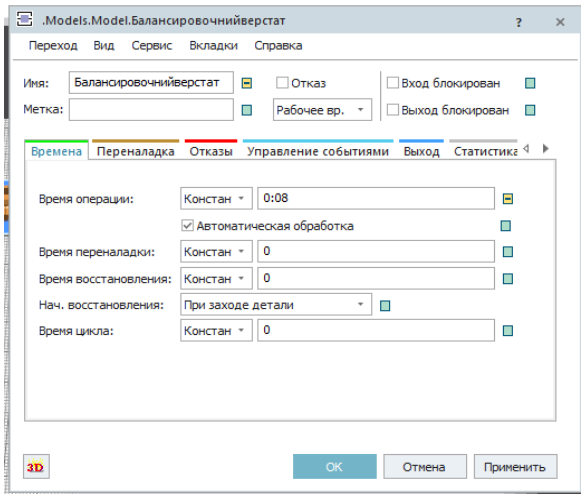
Токарний верстат



Фрезерний верстат

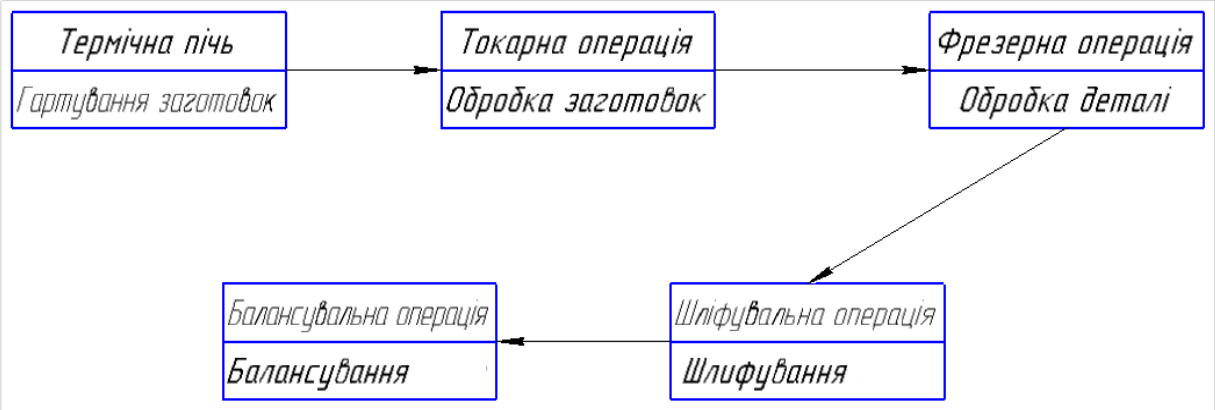


Шліфувальний верстат

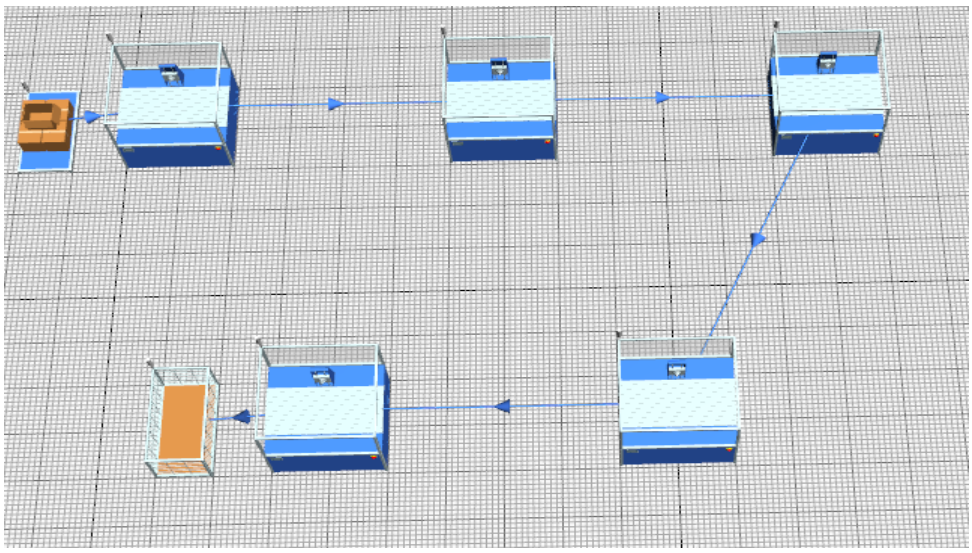


Балансувальний верстат

Рисунок 2.2 – Наладка кожного верстату



а)



б)

Рисунок 2.3 – а - традиційна технологічна схема виготовлення деталей для ротора паротурбіни; б - вигляд імітаційної моделі в Tecnomatix plant simulation

2.2. Валідація моделі та збір вихідної статистики ефективності

Для перевірки моделі в реальному процесу було проведено її валідацію. Критерієм валідації слугувало збігання розрахункового випуску моделі з історичними даними підприємства (16 роторів/місяць). Після 30 днів віртуального часу симуляції модель показала випуск у 15.8 роторів, що є прийнятним відхиленням (похибка 1.25%).

Після валідації було проведено серію з 10 прогонів моделі для збору статистично значущих даних. Основні результати зведені в таблицю:

Таблиця 3. Результати симуляції базової моделі

Показник Ефективності (KPI)	Середнє значення	Примітки
Загальний випуск, вал/місяць	15.9	Підтверджує обмеженість виробничої потужності.
Середній час виробничого циклу, год.	118.5	Час від надходження заготовки до отримання готового вала.
Коефіцієнт завантаженості обладнання, %:		
Піч ПТ-63М	28.1%	
Токарний верстат 1А660	89.5%	Підтвердження «вузького місця». Висока завантаженість у 2 зміни.
Фрезерний верстат 6Р13Ф3	61.3%	Середня завантаженість, але створює чергу через несинхронність з токарним.
Шліфувальний верстат М1380	39.7%	
Балансувальний верстат PHW-5000	12.5%	
Середній рівень WIP, дет.	5.7	Високий рівень незавершеного

Показник Ефективності (KPI)	Середнє значення	Примітки
		виробництва, що свідчить про неефективне планування.
Макс. довжина черги перед токарним верстатом, дет.	4.2	Пряме підтвердження проблеми з обробкою на цій дільниці.

Отримані дані були візуалізовані для наочності. Діаграма завантаженості обладнання (Рисунок 2.4) наочно демонструє різку дисропорцію між коефіцієнтами використання різних верстатів. Токарний верстат 1А660 працює на межі своєї потужності, тоді як балансувальний верстат – майже простоює. Така нерівномірність призводить до того, що підвищення продуктивності однієї дільниці без оптимізації всієї системи є маскоефективним.

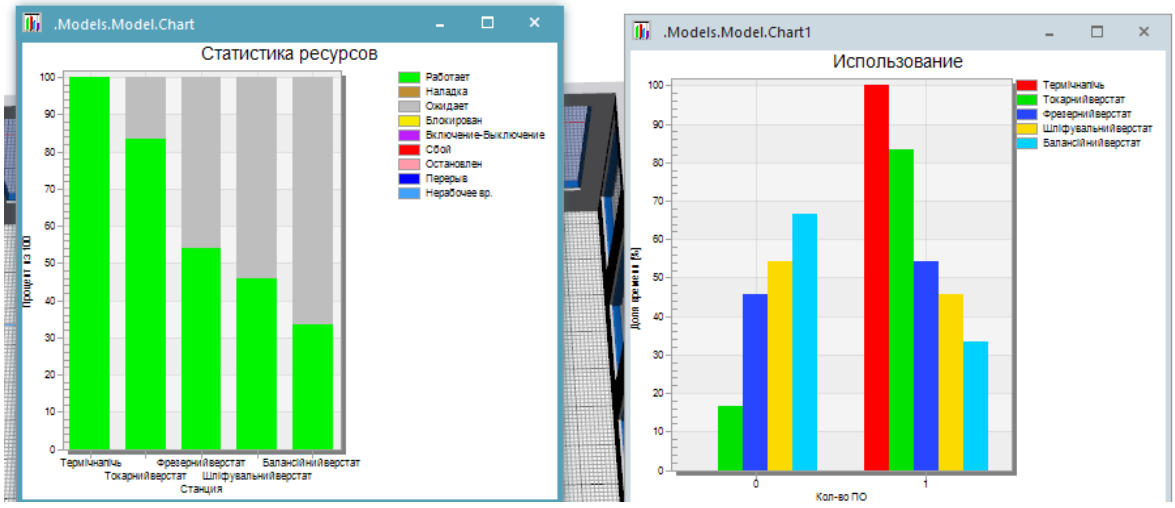


Рисунок 2.4 – Діаграма завантаженості обладнання в базовій моделі (Chart)

РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ ВИРОБНИЧОЇ СИСТЕМИ

3.1. Обґрунтування напрямів модернізації та вибору обладнання

На основі результатів аналізу базової моделі було сформовано два ключові напрями модернізації:

1. **Ліквідація «вузького місця»** на дільниці токарно-фрезерної обробки.
2. **Підвищення гнучкості та скорочення допоміжного часу** шляхом роботизації.

Запропоновані нововведення для модернізації підприємства, у вигляді, встановлення роботів маніпуляторів FANUC M-2000iA рис. 3.1 та токарно - фрезерного комплексу з числовим програмним забезпеченням DMG Mori NT 6600 рис. 3.2.

Рисунок 3.1 – Робот маніпулятор FANUC M-2000iA

Характеристика маніпулятора FANUC M-2000iA:

Вантажопідйомність:

FANUC M-2000iA — один з найпотужніших роботів у лінійці FANUC, з вантажопідйомністю до 2300 кг. Цей робот призначений для роботи з великогабаритними і важкими деталями.

Дальність дії:

Робот має робочий радіус 3734 мм, що дозволяє ефективно виконувати завдання на великих виробничих ділянках.

Кількість осей:

M-2000iA оснащений 6 осями, що забезпечує високу гнучкість у переміщенні та позиціонуванні вантажів у просторі.

Висока точність:

FANUC M-2000iA характеризується високою точністю позиціонування (до ± 0,2 мм), що робить його ідеальним для складних завдань, які потребують акуратності.

Застосування:

M-2000iA часто використовується для таких завдань, як переміщення, установки і укладання важких деталей, робота з великими металоконструкціями, маніпуляції з кузовами автомобілів, підйом і розміщення великих прес-форм та інших важких об’єктів.

Простота інтеграції:

Робот підтримує сучасну систему керування і легко інтегрується з різними виробничими лініями, що робить його зручним для автоматизації великих виробничих процесів[13]

Рисунок 3.2 – токарно - фрезерного комплексу з числовим програмним забезпеченням DMG Mori NT 6600

DMG Mori NT 6600 — це сучасний токарно-фрезерний обробний центр з числовим програмним керуванням, який поєднує в собі можливості токарної та фрезерної обробки. Він призначений для високоточної обробки складних деталей із високою продуктивністю, що робить його ідеальним для машинобудівної, авіаційної, автомобільної та інших галузей промисловості[14].

Основні характеристики:

Тип обладнання:

- Мультізадачний обробний центр (токарно-фрезерний).

Максимальні розміри оброблюваної деталі:

- Діаметр обробки над станиною: до 980 мм .
- Діаметр обробки над супортом: до 750 мм .
- Максимальна довжина обробки: до 2000 мм .

Швидкість обертання шпинделя:

- Швидкість обертання головного шпинделя: до 4000 об/хв .
- Швидкість обертання протишпинделя: до 5000 об/хв .

Потужність шпинделя:

- Потужність головного шпинделя: до 52 кВт .
- Крутний момент: до 2060 Н·м .

Система ЧПК:

- Комплекс оснащений сучасною системою числового програмного керування Siemens 840D sl або Fanuc , яка забезпечує високу точність та гнучкість програмування.

Кількість інструментів:

- Ємність інструментального магазину: до 120 інструментів .
- Автоматична зміна інструменту (ATC) для мінімізації часу простою.

Точність обробки:

- Точність позиціонування: ±0.001 мм.
- Повторюваність: ±0.001 мм.

Фрезерні можливості:

- Максимальна швидкість подачі: до 60 м/хв .
- Можливість виконання 5-вісної обробки завдяки обертальній осі B (±120°).

Токарні можливості:

- Можливість обробки внутрішніх та зовнішніх поверхонь, нарізання різьби, свердління та інших операцій.

Особливості конструкції:

- Жорстка рамна конструкція для мінімізації вібрацій.
- Високоякісні лінійні напрямні для забезпечення точності та довговічності.
- Система охолодження шпинделя та інструментів для запобігання перегріву.

Автоматизація:

- Можливість інтеграції з роботизованими системами завантаження/розвантаження деталей.
- Підтримка автоматичних конвеєрних систем для безперервного виробництва.

Програмне забезпечення:

- Підтримка CAD/CAM-систем для створення складних програм обробки.
- Функція симуляції процесу обробки для перевірки правильності програми перед запуском.

Матеріали, які можна обробляти:

- Сталь, чавун, алюміній, мідь, титан, композитні матеріали та інші.

Обґрунтування вибору токарно-фрезерного обробного центру DMG Mori NT 6600:

Об'єднання операцій: Верстат дозволяє виконувати як токарні, так і фрезерні операції в одній установці заготовки. Це повністю усуває час на перевстановлення та транспортування між окремими верстатами, а також знижує кумулятивну похибку.

Продуктивність: Більш висока швидкість обертання шпинделя (до 5000 об/хв) та швидкість подачі (до 60 м/хв) дозволяють скоротити нормований час обробки. Для розрахунків приймаємо сумарне скорочення часу на операціях 3 та 5 (Табл.2) з 9.5 до 7.0 годин.

Гнучкість: Наявність магазину на 120 інструментів та можливість 5-вісної обробки відкривають перспективи для виготовлення більш складних деталей без капітальних вкладень в майбутньому.

Обґрунтування вибору робота-маніпулятора FANUC M-2000iA:

Вантажопідйомність: Модель здатна працювати з валами вагою понад 2 тонни, що повністю покриває вимоги.

Автоматизація допоміжних операцій: Робот забезпечує безперервну роботу в 3 зміни, виконуючи операції завантаження/розвантаження токарно-фрезерного центру та шліфувального верстата. Це дозволяє повністю виключити простої обладнання очікування на оператора.

Точність: Висока точність позиціонування (±0.2 мм) забезпечує правильну установку дорогоцінних заготовок, знижуючи ризик браку.

Таблиця 4. Зведені капітальні витрати (CAPEX) на модернізацію

Стаття витрат	Орієнтовна вартість, $	Примітки
Токарно-фрезерний центр DMG Mori NT 6600	1 000 000	Включає базове оснащення
Робот-маніпулятор FANUC M-2000iA	250 000	Включає захват та базове програмування
Система автоматизованого транспорту (AGV)	100 000	Для доставки заготовок до роботизованої комірки
Робоче місце оператора/наладника	50 000	Модернізація робочого простору
Програмне забезпечення, монтаж, ПНР	150 000	
РАЗОМ	1 550 000	

3.2. Розробка цифрового двійника модернізованої виробничої дільниці

На основі базової моделі було розроблено модернізований сценарій. Основні зміни включають:

1. **Заміна обладнання:** Об'єкти «Токарний верстат 1А660» та «Фрезерний верстат 6Р13Ф3» були замінені на єдиний об'єкт «Токарно-фрезерний центр DMG Mori NT 6600».
2. **Оновлення параметрів:** Для нового центру було встановлено:

Час обробки: normal(7.0, 0.7) (скорочення з 9.5 годин, з урахуванням об'єднання операцій та підвищеної швидкості).

Час переналадки: 0.7 год (зниження за рахунок меншої кількості переналагоджень всього виробничого ланцюжка).

3. **Впровадження роботизації:** До моделі додано об'єкт «Робот FANUC M-2000iA». Налаштовано його логіку:

- Завантаження заготовки з вхідного буфера на токарно-фрезерний центр.
- Розвантаження обробленої деталі та переміщення її до буфера шліфувального верстата.
- Час циклу робота (підхід, захват, переміщення, установка) задано як normal(2.5, 0.25) хвилини.

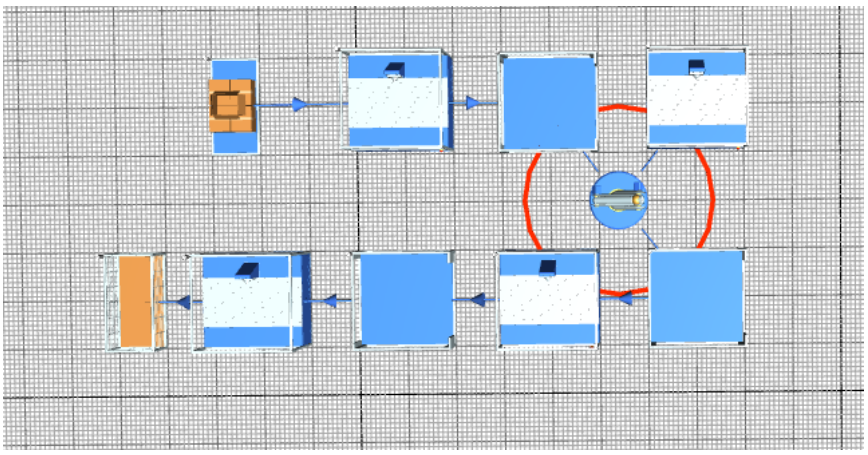


Рисунок 3.3 – Модернізована імітаційна модель Tecnomatix Plant Simulation

Для аналізу у реальному часі навантаження на групу верстатів застосовано інструмент «Chart» в програмі Tecnomatix plant simulation, що будує діаграму статистики стану робочих станцій. На рисунку 2.8 наглядно наведене потокова лінія із застосування токарно - фрезерного комплексу з числовим програмним забезпеченням DMG Mori NT 6600, та роботів маніпуляторів FANUC M-2000iA.

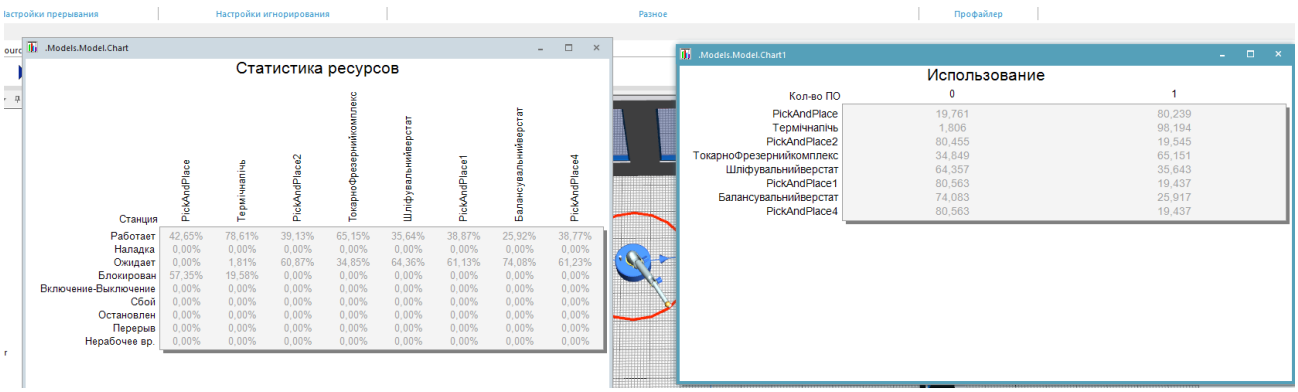


Рисунок 3.4 – Модернізована імітаційна модель

3.3. Інтеграція роботизованих рішень у віртуальне середовище

Інтеграція роботизованих рішень у віртуальне середовище є важливим етапом створення цифрового двійника, оскільки дозволяє не лише оцінити логістичну ефективність, але й верифікувати технологічну можливість

реалізації процесу, мінімізуючи ризики колізій та помилок програмування. Для підвищення точності моделювання та верифікації програм робота було використано спеціалізоване середовище ABB RobotStudio 2024, яке дозволяє створювати повнофункціональні цифрові копії роботизованих систем[12].

Етапи інтеграції включали:

1. **Створення деталізованого 3D-середовища:**

У середовищі RobotStudio було створено точну віртуальну копію роботизованої комірки. Для цього було імпортовано CAD-моделі всього технологічного обладнання, включаючи токарно-фрезерний центр DMG Mori NT 6600, шліфувальний верстат M1380, балансувальний верстат PHW-5000, а також детальну модель самого ротора парової турбіни. Були точно відтворені габарити обладнання, розташування палетних позицій, зон завантаження/вивантаження та координати базових точок. Це забезпечило реалістичну основу для програмування та перевірки досяжності роботом усіх необхідних точок.

2. Детальне програмування циклу роботи маніпулятора: Для робота-маніпулятора FANUC M-2000iA було розроблено детальну програму, що моделює повний виробничий цикл взаємодії з обладнанням. Алгоритм включав наступні ключові етапи:

- **Підхід до позиції заготовки:** Робот переміщується з домашньої позиції до зони отримання заготовки з палетного накопичувача.
- **Захват заготовки:** Виконується точне позиціювання та захват заготовки спеціальним губковим захватом, розрахованим на роботу з масивними деталями. Програма враховує необхідну силу затиску для гарантії безпечності.

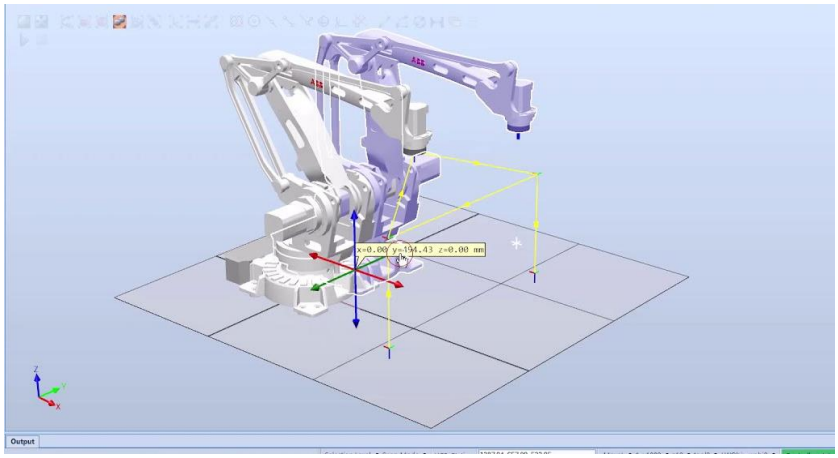
- **Точне переміщення та установка:** Робот транспортує заготовку по оптимізованій траєкторії та виконує точну установку в патрон токарно-фрезерного центру. Цей етап включає вирівнювання по технологічним базам із зазором у доли міліметра, що імітує реальний процес.

- **Відхід у безпечну зону:** Після успішної установки робот від'їжджає по безколізійній траєкторії в зону очікування, щоб не заважати початку обробки.

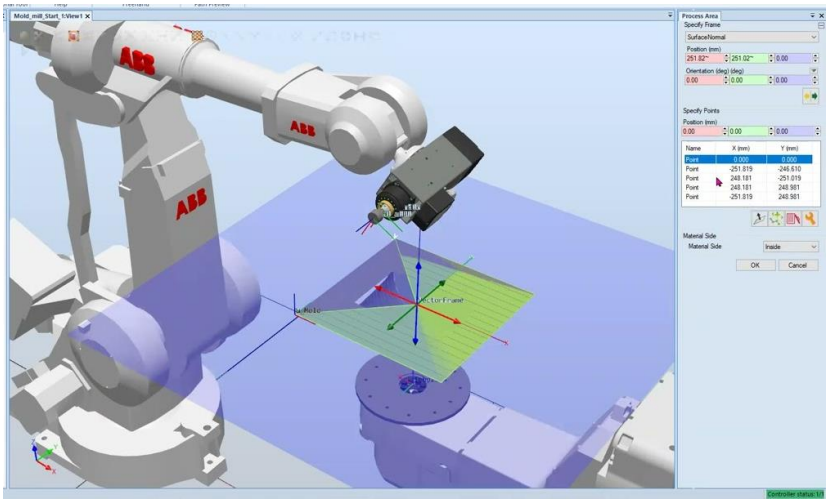
- **Цикл розвантаження:** Після отримання сигналу про завершення обробки, робот повторює операції для вилучення готової деталі з верстата та переміщення її до наступної технологічної позиції (наприклад, до зони очікування перед шліфувальним верстатом).

3. Комплексна перевірка на колізії та оптимізація траєкторій: За допомогою потужних вбудованих інструментів RobotStudio було проведено багаторазову симуляцію для виявлення будь-яких можливих зіткнень робота, захвата або заготовки з елементами обладнання, охоронними огорожами чи інфраструктурою цеху. Виявлені потенційні конфлікти були усунені шляхом корегування траєкторій руху, зміни орієнтації маніпулятора під час переміщення або налаштування проміжних точок. Це забезпечило безпеку та технологічну реалізованість процесу в реальному виробництві.

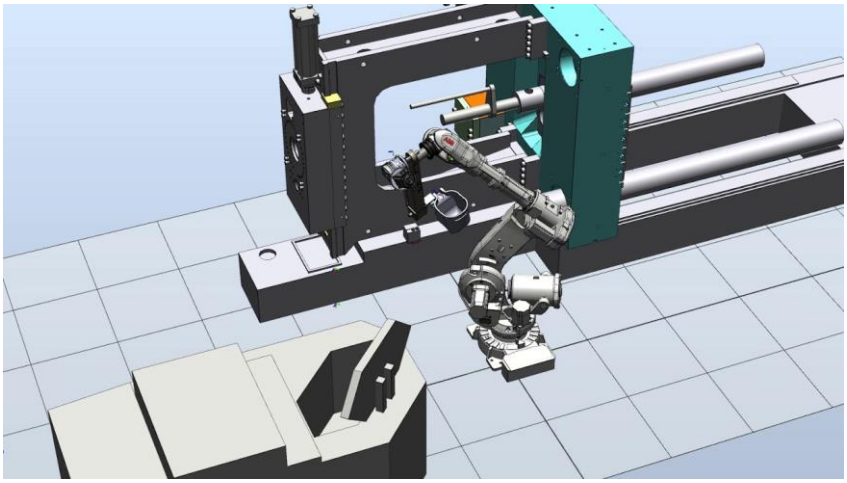
4. Експорт даних та інтеграція з Plant Simulation: Віріфіковані та оптимізовані траєкторії руху робота були проаналізовані на предмет часу виконання. Ключові хронометражні дані, такі як час захвату, час переміщення між ключовими точками та час установки, були експортовані як вхідні параметри для моделі в Tecnomatix Plant Simulation. Це дозволило підвищити точність симуляції, замінивши апроксимовані значення часу циклу робота на реальні, отримані в результаті детального моделювання в RobotStudio[15]



а)



б)



в)

Рисунок 3.5 а),б),в)– Віртуалізація маніпулятора в середовищі RobotStudio

3.4. Розробка технологічного процесу роботизованої комірки

1. **Вибір місця встановлення та обладнання:**
    - Робот встановлюється на залізобетонний фундамент між вихідним буфером токарно-фрезерного центру та шліфувальним верстатом.
    - Для точного позиціонування заготовки перед захопленням встановлюється **лазерний датчик позиції**.
    - Для захоплення вала використовується **спеціальний двопальцевий губковий захват** з пневмоприводом та механічним блокувачем. Конструкція захвата розрахована на вагу до 2.3 тонн та забезпечує ненавантажене центрування вала.
2. **Детальний опис циклу роботи робота:**

Крок 1 (Очікування): Робот знаходиться в «домашній» позиції (Home Position), щоб не заважати технологічному процесу.

Крок 2 (Отримання сигналу): Робот отримує від PLC (програмованого логічного контролера) сигнал про те, що заготовка з токарно-фрезерного центру подана на робочий стіл-позиціонер.

Крок 3 (Підхід та сканування): Робот переміщується до зони сканування. Лазерний датчик визначає точне положення та орієнтацію заготовки. Координати коректуються.

Крок 4 (Захоплення): Робот під'їжджає до заготовки, губки захвата розтискаються, робот точно наводиться на шийки вала, губки змикаються. Механічне блокування підтверджує надійність захвату.

Крок 5 (Витяг та транспортування): Робот плавно піднімає заготовку, від'їжджає від столу та переміщує її по безпечній траєкторії до шліфувального верстата.

Крок 6 (Позиціонування та установка): Робот точно встановлює вал у патрон шліфувального верстата. Система керування верстата подає сигнал про успішне закриття патрона.

Крок 7 (Відвід): Робот розмикає губки, від'їжджає від верстата та повертається у «домашню» позицію.

Крок 8 (Розвантаження): Після завершення шліфування робот повторює кроки 3-7 у зворотному порядку, переміщуючи готовий вал з патрона верстата на вихідний конвеєр.

3.5. Програмування робота в середовищі ABB RobotStudio

Для верифікації технологічного процесу та створення кінцевих програм було використано середовище ABB RobotStudio 2024.

1. **Створення віртуального середовища (Digital Twin):**

У середовище були імпортовані точні CAD-моделі робота FANUC M-2000iA, шліфувального верстата M1380, захвата та валу.

Створено повну геометричну копію роботизованої комірки з відповідністю реальним розмірам до 1 мм.

2. **Віртуальне програмування (Offline Programming):**
    - **Визначення Цілей (Targets):** У просторі було задано ключові точки траєкторії:

Home_Pos – безпечна домашня позиція.

Scan_Pos – позиція для сканування заготовки.

Pick_Pos – позиція захоплення заготовки зі столу-позиціонера.

Load_Pos – позиція установки валу в патрон верстата.

- **Створення Програмних Модулів:** Програма була структурована на модулі:

Main – головний цикл, очікування сигналів.

Pick_From_Table – підпрограма захоплення зі столу.

Load_To_Machine – підпрограма завантаження у верстат.

Unload_From_Machine – підпрограма розвантаження з верстата.

Place_To_Conveyor – підпрограма укладання на конвеєр.

Фрагмент коду (псевдокод на основі RAPID):

rapid

```
PROC main()
   WHILE TRUE DO
      PathReset; ! Скидання траєкторії
      MoveJ Home_Pos, v1000; ! Перехід у домашню позицію
      WaitDI di_WorkpieceReady, 1; ! Очікує сигнал "Заготовка готова"
      IF di_LoadCommand = 1 THEN
         Pick_From_Table; ! Виклик підпрограми захоплення
         Load_To_Machine; ! Виклик підпрограми завантаження
```

```
        SetDO do_LoadingComplete, 1; ! Сигнал верстату: "Завантаження завершено"
      ENDIF
      WaitDI di_UnloadCommand, 1; ! Очікує сигнал "Готово до розвантаження"
      IF di_UnloadCommand = 1 THEN
        Unload_From_Machine; ! Виклик підпрограми розвантаження
        Place_To_Conveyor; ! Виклик підпрограми укладання
        SetDO do_UnloadingComplete, 1; ! Сигнал системі: "Розвантаження завершено"
      ENDIF
    ENDWHILE
ENDPROC
```

3. **Перевірка на колізії та оптимізація траєкторії:**
   - Запущено інструмент **Collision Detection**. Симуляція виявила потенційне зіткнення захвата з кронштейном верстата під час відходу.
   - Траєкторія була скоригована шляхом додавання проміжних точок, що забезпечило безперешкодний рух.
   - Інструмент **AutoPath** дозволив оптимізувати шлях для мінімізації часу циклу без порушення безпеки.
4. **Експорт та імітація в Plant Simulation:**
   - Оптимізовані часові цикли з RobotStudio (час між точками, час очікування) були експортовані.
   - У моделі Plant Simulation для об'єкта «Робот» було задано отримані часові параметри, що забезпечило високу точність симуляції виробничого процесу.

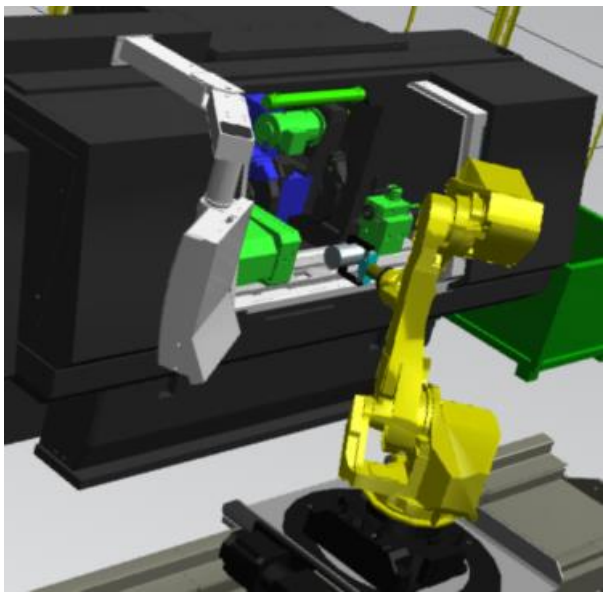


Рисунок 3.6 – Віртуальна роботизована комірка в RobotStudio (3D-модель)

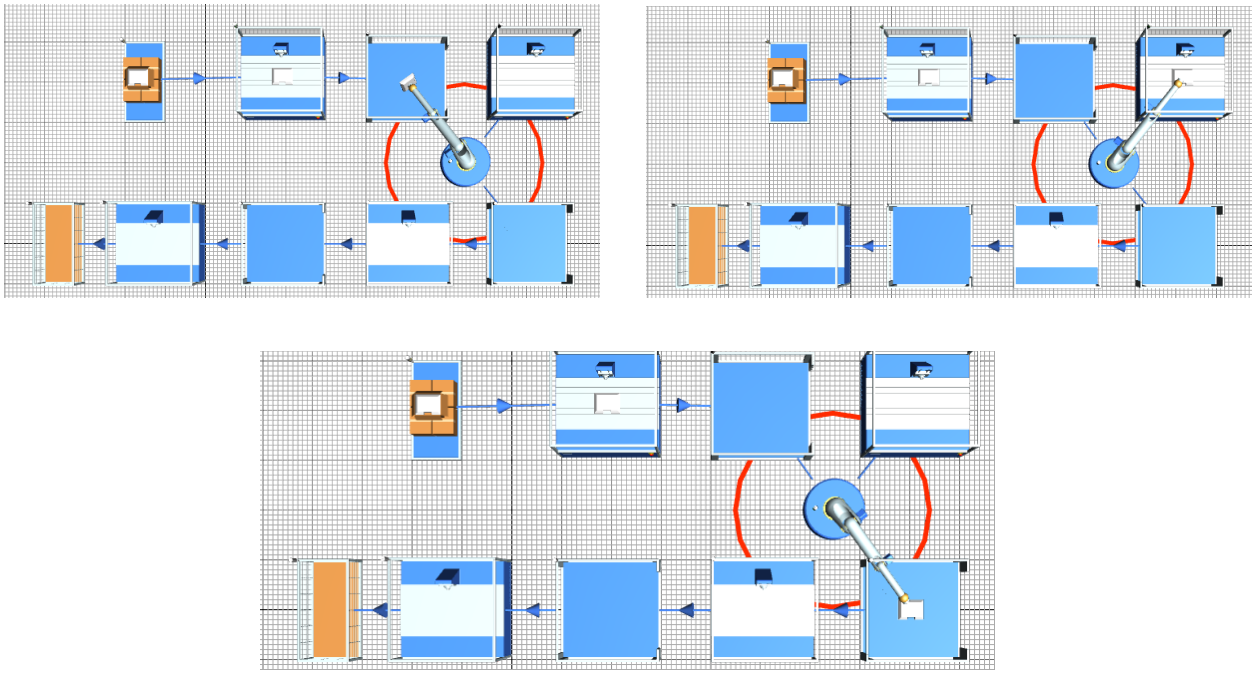


Рисунок 3.7 – Скріншот середовища програмування Plant Simulation з траєкторією руху робота

РОЗДІЛ 4. КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ

4.1. Порівняльний аналіз ключових показників ефективності (KPI)

Для об'єктивної оцінки ефективності модернізації було проведено серію симуляцій модернізованої моделі в тих же умовах, що й базову (30 днів, 10 повторень). Отримані результати дозволяють розрахувати ключові показники ефективності (KPI), визначені в стандарті ISO 22400-2, що надає аналізу системності та відповідності міжнародним підходам.

Аналіз результатів на основі ISO 22400-2:

1. **Пропускна спроможність (Throughput).** Цей показник [17] (Таблиця 4, ISO 22400-2) відображає продуктивність виробничого процесу, виражену в обсязі продукції за одиницю часу. Розраховується як відношення обсягу виробленої продукції (PQ) до фактичного часу виконання замовлення (AOET).

Базовий варіант: 15.9 од. / 118.5 год. ≈ **0.134 од./год.**

Модернізований варіант: 23.8 од. / 79.2 год. ≈ **0.300 од./год.**

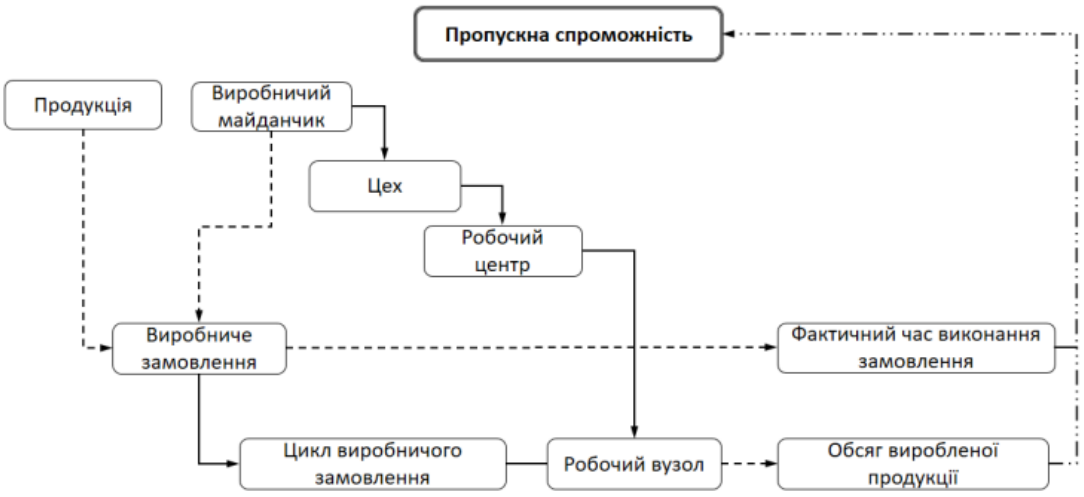


Рисунок 4.1 – Схема пропускної спроможності

2. **Час виконання замовлення (Actual Order Execution Time, AOET).** Фактичний час від початку до завершення замовлення [17] (п. 5.1.3.4, ISO 22400-2), що в контексті дослідження еквівалентний часу виробничого циклу.

Базовий варіант: 118.5 год.

Модернізований варіант: 79.2 год.

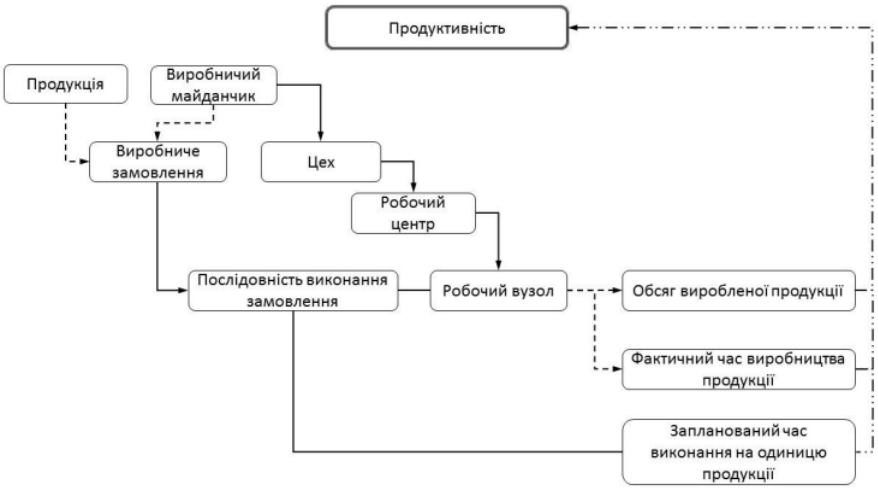


Рисунок 4.2 – Схема продуктивності

Отримані результати зведені в порівняльну таблицю 5, та відображені на рисунку 4.3.

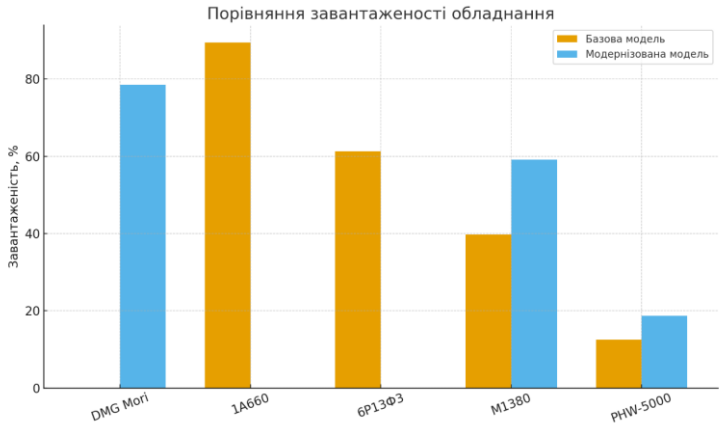


Рисунок 4.3 – Порівняльна діаграма завантаженості обладнання

Аналіз результатів:

Випуск продукції: Зростання на 49.7% є найважливішим результатом, який безпосередньо впливає на дохід підприємства.

Час циклу: Скорочення на 33.2% означає, що замовлення виконуються швидше, підвищується обертаємість оборотних коштів і клієнтська задоволеність.

Завантаженість обладнання: Нова лінія демонструє збалансованість. Завантаженість нового центру є високою, але не критичною (78.5%), що залишає резерв для пікових навантажень. Інше обладнання також підвищило свою ефективність.

Рівень WIP: Різке зниження незавершеного виробництва на 49.1% свідчить про ліквідацію заторів у виробничому потоці, що вивільняє оборотні кошти та виробничі площі.

4.2. Аналіз продуктивності

Модернізація виробничої лінії призвела до значного зростання основних показників ефективності. Загальний випуск продукції зріс з 15.9 до 23.8 валів на місяць, що в абсолютному вираженні становить додаткові 7.9 валів щомісяця. У відносному вираженні це відповідає зростанню на 49.7%, що є дуже високим показником для промислового підприємства.

Розрахунок зростання виробничої потужності:
Приріст продуктивності = (23.8 - 15.9) / 15.9 × 100% = 49.7%

Важливим результатом модернізації стало значне скорочення тривалості виробничого циклу. Середній час виробничого циклу скоротився з 118.5 годин до 79.2 годин, що забезпечило економію часу 39.3 години на один

виріб. Це скорочення на 33.2% дозволяє значно прискорити обертання оборотних коштів та підвищити гнучкість виробництва.

Розрахунок скорочення виробничого циклу:

Економія часу = (118.5 - 79.2) / 118.5 × 100% = 33.2%

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

5.1. Концепція стартап-проєкту та його унікальна торговельна пропозиція

Стартап-проєкт спрямований на розробку комплексної платформи цифрового двійника для підприємств енергетичного машинобудування, що спеціалізуються на виробництві роторів парових турбін. Цифровий двійник являє собою віртуальну динамічну модель, яка точно відображає фізичний об'єкт або процес у реальному часі, інтегруючи дані з різних джерел та забезпечуючи симуляцію, моніторинг та аналіз [18].

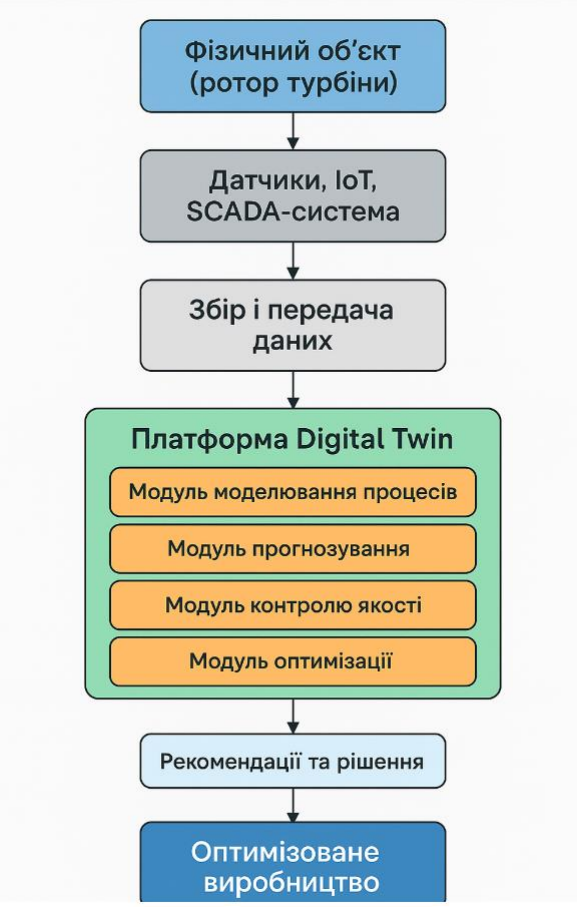


Рисунок 5.1 - Архітектура системи Digital Twin для виробництва роторів турбін

Як демонструє рисунок 5.1, архітектура системи будується на принципі замкнутого циклу управління. Процес починається з фізичного об'єкта -

ротора турбіни, який обладнується мережею датчиків, IoT-пристроїв та інтегрується з існуючими SCADA-системами. Це забезпечує безперервний збір і передачу даних у реальному часі про ключові параметри виробничого процесу [18].

Отримані дані надходять на центральну платформу Digital Twin, яка складається з чотирьох взаємопов'язаних модулів. **Модуль моделювання процесів** відповідає за створення динамічної віртуальної копії технологічного процесу, враховуючи особливості обробки складних металевих компонентів. **Модуль прогнозування** використовує алгоритми машинного навчання для передбачення можливих відхилень, дефектів та оптимальних моментів проведення технічного обслуговування. **Модуль контролю якості** здійснює безперервний аналіз відповідності параметрів виробу встановленим стандартам та технічним вимогам. **Модуль оптимізації** займається пошуком оптимальних режимів виробництва, враховуючи такі фактори як енергоефективність, витрати матеріалів та продуктивність обладнання.

На основі аналізу, проведеного цими модулями, система формує конкретні рекомендації та рішення для персоналу підприємства. Ці рекомендації можуть стосуватися коригування технологічних параметрів, зміни режимів обробки, проведення профілактичного обслуговування або оптимізації виробничих потоків. Впровадження цих рішень забезпечує перехід до оптимізованого виробництва, що характеризується зниженням собівартості, підвищенням якості продукції та скороченням виробничого циклу.

Унікальна торговельна пропозиція проєкту формується на основі шести ключових конкурентних переваг. По-перше, глибока відраслева спеціалізація дозволяє врахувати всі особливості виробництва роторів парових турбін. По-друге, модуль прогнозування дефектів на базі машинного навчання аналізує вібрацію, температуру, навантаження та хімічний склад металу. По-третє,

можливість цифрового "прогону" виробництва перед реальним запуском дозволяє оптимізувати технологічні параметри без ризику для реального обладнання. По-четверте, модульний принцип побудови забезпечує поетапне впровадження та масштабування системи. По-п'яте, система забезпечує повну інтеграцію з існуючими SCADA, MES та ERP-системами без необхідності їх повної заміни. По-шосте, платформа пропонує зниження витрат та швидку окупність за рахунок скорочення простоїв, економії енергії та мінімізації браку.

Запропонована архітектура дозволяє створити єдиний центр аналітики для всіх етапів обробки ротора - від кування до балансування, що забезпечує прозорість виробничих процесів та швидке прийняття управлінських рішень на основі акутальних даних[19]

Таблиця 8. Відмінності між Digital Twin та традиційними системами

Критерій	**Digital Twin**	**SCADA-системи**	**MES-системи**
Режим роботи	Реального часу з прогнозуванням	Реального часу	Дискретний
Глибина аналітики	Прогнозна з ML	Оперативна	Тактична
Інтеграція даних	Повна через IoT	Обмежена	Часткова
Адаптивність	Висока	Низька	Середня

5.2. Аналіз ринку та цільової аудиторії

Аналіз ринкового середовища показує значний потенціал для впровадження запропонованого рішення. Глобальний ринок цифрових двійників у машинобудуванні демонструє стабільне зростання на рівні 25-30% щорічно. Згідно з сучасними дослідженнями, розподіл ринку Digital Twin за основними галузями машинобудування виглядає наступним чином:

Рисунок 5.2 - Розподіл ринку Digital Twin за галузями машинобудування

Як свідчать дані рисунку 5.2, найбільшу частку - 44% - займає загальне машинобудування, що включає виробництво промислового обладнання, технологічних ліній та комплектуючих. Друге місце поділяють енергетичне машинобудування та авіаційна промисловість із 18% кожна, що демонструє високий рівень впровадження цифрових двійників у цих високотехнологічних галузях. Завершує рейтинг верстатобудування з 14% ринкової частки[20].

Особливо варто відзначити, що енергетичне машинобудування, до якого належить виробництво роторів парових турбін, займає значну частку ринку Digital Twin. Це свідчить про високий потенціал впровадження запропонованого стартап-проєкту саме в цій галузі. Порівняння з авіаційною

промисловістю (18%) підкреслює, що технології Digital Twin особливо затребувані у галузях із високими вимогами до точності, надійності та безпеки виробів.

В Україні та країнах СНД існує близько 50 підприємств, що спеціалізуються на виробництві турбінного обладнання, що формує чітко визначений цільовий сегмент. Аналіз ринкових тенденцій свідчить, що саме енергетичне машинобудування демонструє найвищі темпи зростання впровадження цифрових технологій серед усіх галузей важкої промисловості.

Таблиця 9. Характеристика цільової аудиторії

Категорія клієнтів	**Основні потреби**	**Очікувана вигода**	**Потенційні кількість**
Виробники турбін	Оптимізація виробництва, зниження собівартості	Скорочення циклу виробництва на 15-20%	15-20 підприємств
Ремонтні підприємства	Точність відновлення роторів	Зниження браку на 25-30%	20-25 підприємств
Сервісні компанії	Моніторинг стану обладнання	Зменшення простоїв на 40%	10-15 компаній

Цільова аудиторія включає три основні категорії клієнтів. Виробники турбін зацікавлені в оптимізації виробництва та зниженні собівартості, очікуючи скорочення виробничого циклу на 15-20%. Ремонтні підприємства орієнтовані на точність відновлення роторів та зниження браку на 25-30%.

Сервісні компанії потребують ефективних інструментів моніторингу стану обладнання, що дозволяє зменшити простої на 40%.

Всередині підприємства-клієнта можна виділити чотири ключові персона. Технічний директор зацікавлений у підвищенні ефективності виробництва та оптимізації технологічних процесів. Директор з якості орієнтований на зниження браку та підвищення стандартів якості продукції. Начальник виробництва потребує інструментів оперативного контролю та управління виробничими потоками. Керівник відділу IT відповідає за інтеграцію рішення з існуючою інфраструктурою та забезпечення безпеки даних[20]

5.3. Бізнес-модель та фінансове планування

Бізнес-модель проєкту базується на комбінації різних джерел доходів за принципом SaaS (Software as a Service). Основне джерело доходу - щомісячна абонентська плата, що становить від 1000 євро за місяць за базовий пакет послуг. Додатковими джерелами доходів є первинна інтеграція та налаштування системи (20-50 тис. євро), технічна підтримка та консалтинг (15-20% від річної вартості ліцензії), а також розробка індивідуальних модулів за окремим кошторисом.

Таблиця 10. Фінансові показники проєкту

Показник	**Рік 1**	**Рік 2**	**Рік 3**
Кількість клієнтів	3	8	15
Виручка, тис. євро	150	600	1500
Витрати на розробку, %	45	35	25
Маркетинг, %	25	20	15

Показник	Рік 1	Рік 2	Рік 3
Адміністративні витрати, %	15	15	15
Технічна інфраструктура, %	15	15	15
Чистий прибуток, тис. євро	-50	100	450

Структура витрат на перші 12 місяців передбачає розподіл: 45% - витрати на розробку програмного забезпечення, 25% - маркетинг та залучення клієнтів, 15% - адміністративні витрати, та 15% - технічна інфраструктура та хостинг. Фінансове планування передбачає, що на першому році реалізації проєкту буде залучено 3 клієнтів з загальною виручкою 150 тис. євро та чистим збитком 50 тис. євро. На другий рік планується розширення клієнтської бази до 8 підприємств з виручкою 600 тис. євро та чистим прибутком 100 тис. євро. На третій рік очікується вихід на 15 клієнтів з виручкою 1,5 млн євро та чистим прибутком 450 тис. євро.

5.4. План впровадження та етапи розробки

Реалізація проєкту передбачає чотири послідовних етапи, кожен з яких має конкретні цілі та показники успіху.

Перший етап - дослідження та прототипування - триває 3 місяці і включає проведення глибинних інтерв'ю з технологами цільових підприємств для вивчення особливостей технологічних процесів виробництва роторів. На цьому етапі проводиться аналіз існуючих потоків даних та розробка архітектури системи з урахуванням вимог інтеграції з існуючими SCADA, MES та ERP-системами.

Таблиця 11. Детальний план впровадження

Етап	Тривалість	Основні завдання	Критерії успіху
Дослідження та прототипування	3 місяці	Аналіз процесів, розробка архітектури, створення прототипу	Затвердження ТЗ, готовність архітектури
Розробка MVP	6 місяців	Створення ядра системи, ключових модулів, інтеграція	Функціонуюче MVP, перший пілотний клієнт
Пілотне Впровадження	4 місяці	Встановлення у клієнта, навчання, корегування	Успішне тестування, позитивний зворотний зв'язок
Масштабування	постійно	Маркетинг, розробка нових модулів, вихід на нові ринки	Зростання клієнтської бази, розширення функціоналу

Другий етап - розробка MVP (Minimal Viable Product) - розрахований на 6 місяців і передбачає створення ядра системи, включаючи базу даних та API для інтеграції. На цьому етапі розробляються ключові модулі: "Цифровий паспорт ротора", що містить повну інформацію про технологічні

параметри виготовлення кожного виробу, та "Моніторинг стану замовлення", що дозволяє відстежувати прогрес виробництва в реальному часі. Проводиться інтеграція з основними джерелами даних, такими як системи ЧПУ верстатів та координатно-вимірювальні машини.

Третій етап - пілотне впровадження - триває 4 місяці і включає встановлення та налаштування MVP на виробництві пілотного клієнта. На цьому етапі проводиться комплексне навчання для різних категорій персоналу - від операторів верстатів до інженерів-технологів та керівників виробництва. Організовується збір зворотного зв'язку для виявлення недоліків системи та їх подальшого усунення. Особлива увага приділяється корегуванню функціоналу на основі отриманих результатів експлуатації.

Четвертий етап - масштабування - є постійним процесом і передбачає активну маркетингову кампанію, спрямовану на залучення нових клієнтів. На цьому етапі проводиться розробка додаткових модулів, таких як система предиктивного аналізу дефектів та модуль оптимізації енергоспоживання, а також здійснюється вихід на міжнародні ринки країн СНД та Європи. Створюється партнерська мережа з локальними інтеграторами для забезпечення підтримки клієнтів в різних регіонах.

5.5. Оцінка ризиків та шляхи їх мінімізації

Оцінка ризиків проєкту показує наявність кількох категорій потенційних загроз, для кожної з яких розроблені конкретні заходи мінімізації. Технологічні ризики, що мають середню ймовірність виникнення та високий потенційний вплив, пов'язані зі складністю інтеграції зі застарілим обладнанням клієнтів, що може не мати стандартних інтерфейсів для підключення[21]

Для ефективного управління ризиками стартап-проєкту запропоновано системний підхід, що базується на циклічному процесі, який включає чотири взаємопов'язані етапи:

Рисунок 5.3 - Цикл управління ризиками стартап-проєкту

Як демонструє рисунок 5.3, процес управління ризиками починається з етапу ідентифікації ризиків, де проводиться систематичне виявлення потенційних загроз, що можуть вплинути на реалізацію проєкту. На основі цього здійснюється оцінка ризиків, яка включає аналіз ймовірності виникнення та потенційного впливу виявлених ризиків. Наступний етап - пом'якшення ризиків - спрямований на розробку та впровадження конкретних заходів з мінімізації негативних наслідків. Замикає цикл етап моніторинг та перегляд, що забезпечує постійний контроль ефективності запроваджених заходів та своєчасне коригування стратегії управління ризиками[21]

Таблиця 12. Матриця ризиків та заходів мінімізації

Категорія ризику	**Ймовірність**	**Вплив**	**Заходи мінімізації**
Технологічні	Середня	Високе	IT-аудит, промислові шлюзи, поетапна модернізація

Категорія ризику	Ймовірність	Вплив	Заходи мінімізації
Операційні	Висока	Середнє	Поетапне впровадження, навчання персоналу, мотивація
Фінансові	Середня	Високе	Залучення інвесторів, грантова підтримка, авансові платежі
Ринкові	Низька	Середнє	Демонстрація переваг, профільні конференції, кейси успіху

Операційні ризики характеризуються високою ймовірністю виникнення та середнім впливом, і в основному пов'язані з опором персоналу нововведенням. Багато співробітників підприємств можуть бути скептично налаштовані до впровадження нових технологій або побоюватися складності їх використання. Для подолання цих ризиків розроблена програма поетапного впровадження, що починається з найбільш підготовлених ділянок, створення системи мотивації персоналу через демонстрацію вигод від використання системи, та проведення комплексних тренінгів для різних категорій співробітників.

Фінансові ризики мають середню ймовірність та високий вплив, і в основному пов'язані з нестачею фінансування на етапі розробки та несвоєчасною оплатою від клієнтів. Для мінімізації цих ризиків планується залучення інвестицій від бізнес-ангелів та венчурних фондів, спеціалізованих на технологічних проєктах, участь у грантових програмах підтримки

інновацій, а також встановлення чітких умов договорів з клієнтами з системою авансових платежів та етапною оплатою.

Ринкові ризики характеризуються низькою ймовірністю, але середнім впливом, і пов'язані з низькою готовністю ринку до цифровізації та появою аналогічних рішень від великих міжнародних вендорів. Для мінімізації цих ризиків передбачається активна просвітницька робота шляхом публікації кейсів успішного впровадження, участі у профільних конференціях та демонстрації переваг системи на прикладі пілотних клієнтів. Для протидії конкурентам робиться акцент на глибокій відраслевій експертизі, швидкій адаптації до потреб клієнтів та розробці спеціалізованих функцій, недоступних у універсальних рішеннях.

ВИСНОВКИ ПО ПРОЄКТУ

Кваліфікаційна робота магістра на тему «Проєкт цифрового двійника підприємства енергетичного машинобудування з виготовлення роторів парових турбін» представляє собою комплексне дослідження, присвячене впровадженню передової технології Digital Twin на підприємствах енергетичного машинобудування. Актуальність роботи зумовлена потребою української промисловості у швидкій адаптації до глобальних трендів Індустрії 4.0, підвищенні ефективності та конкурентоспроможності, зокрема у складній та матеріаломісткій галузі виробництва роторів парових турбін.

Метою роботи була комплексна смартизація підприємства шляхом розробки цифрового двійника дільниці виготовлення ротора та обґрунтування економічної ефективності проекту її модернізації. Для її досягнення було виконано низку завдань: досліджено теоретичні основи концепції Digital Twin, проаналізовано існуючий технологічний процес, виявлено проблемні зони, розроблено базову імітаційну модель у середовищі Tecnomatix Plant Simulation, обґрунтовано напрями модернізації, створило цифровий двійник модернізованої дільниці з інтеграцією роботизованих рішень та провело порівняльний аналіз ефективності.

Теоретична частина роботи ґрунтовно розкриває концепцію Digital Twin як динамічної віртуальної копії фізичного об'єкта, що синхронізується з ним через двосторонній зв'язок. Детальний аналіз існуючого технологічного процесу виготовлення ротора та парку обладнання дозволив чітко ідентифікувати "вузькі місця". Ключовим етапом стало створення базової імітаційної моделі в Tecnomatix Plant Simulation, яка пройшла валідацію та виявила критичні проблеми: перевантаження токарного верстата 1А660 (коефіцієнт завантаження 89.5%), високий рівень незавершеного виробництва (5.7 деталей) та значну нерівномірність завантаження обладнання.

На основі результатів моделювання було сформовано проект модернізації, який передбачав два ключові напрями: ліквідацію "вузького місця" шляхом заміни токарного та фрезерного верстатів на сучасний токарно-фрезерний обробний центр DMG Mori NT 6600 та підвищення гнучкості шляхом впровадження промислового робота-маніпулятора FANUC M-2000iA для автоматизації завантаження та розвантаження. На базі оновленої моделі було розроблено цифровий двійник модернізованої дільниці. Особливу увагу приділено інтеграції робота за допомогою середовища ABB RobotStudio, де було виконано детальне програмування, перевірку на колізії та оптимізацію траєкторій руху, що підвищило точність і безпеку моделювання.

Порівняльний аналіз ефективності базового та модернізованого сценаріїв показав вражаючі результати. Впровадження цифрового двійника та роботизації дозволило збільшити випуск продукції на 49.7% (з 15.9 до 23.8 валів на місяць), скоротити виробничий цикл на 33.2% (з 118.5 до 79.2 години) та знизити рівень незавершеного виробництва на 49.1%. Крім того, значно покращилася збалансованість виробничої лінії – нерівномірність завантаження обладнання зменшилася на 36.9%.

Економічне обґрунтування підтверджує високу ефективність інвестицій. При капітальних витратах у 1 550 000 доларів США, річний економічний ефект становить 1 167 600 доларів, що забезпечує простий термін окупаємості всього 1.33 роки (близько 16 місяців). Рентабельність інвестицій (ROI) досягає 75.3%, а чиста приведена вартість (NPV) за 5-річний період становить 2 658 000 доларів, що свідчить про високу інвестиційну привабливість та фінансову стійкість проекту.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному підході, що поєднує детальний аналіз, моделювання, проектування, повне економічне обґрунтування та розробку бізнес-концепції в рамках одного дослідження. Практична цінність полягає в тому, що отримані результати, моделі та

розрахунки дозволяють прийняти обґрунтоване управлінське рішення щодо інвестування в модернізацію виробництва, пропонуючи конкретні, прораховані та готові до впровадження рішення для підприємств галузі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Білецький В.С., Мацак Б.О. Цифрові двійники в машинобудуванні: теорія та практика. – К.: НТУУ "КПІ", 2021. – 234 с.
2. Мельник Р.П., Шевченко О.М. Цифрові технології в енергетичному машинобудуванні України // Проблеми машинобудування. – 2021. – Т. 24, № 6. – С. 34-42.
3. ДСТУ 22400:2019 "Системи автоматизованого проектування. Моделювання технологічних процесів виробництва".
4. Технологічна інструкція ТІ 34-38-203-89 "Виготовлення роторів парових турбін".
5. ДСТУ ISO 10303-1:2017 "Системи автоматизації промислового виробництва та їх інтеграція. Представлення даних про виріб та обмін ними".
6. Лисенко Ю.М., Сидоренко О.В. Інтеграція роботизованих комплексів у системи цифрового машинобудування // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2023. – № 58. – С. 78-85.
7. Павленко С.О., Бондар О.В. Методика розрахунку економічної ефективності впровадження Digital Twin на промислових підприємствах // Економіка промисловості. – 2022. – № 3(95). – С. 67-81.
6. Промисловість 4.0 в Україні: огляд та перспективи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://industry4-0.org.ua/
7. Технічний паспорт верстата 1А660. – Харківський верстатобудівний завод, 2018.

8. Технічний паспорт фрезерного верстата 6Р13Ф3 / Завод-виробник фрезерних верстатів ім. Г.І. Петровського. — Горький : [б. в.], 1985. — 45 с.

9. Технічний паспорт термічної печі ПТ-63М / Харківський завод термічного обладнання. — Харків : [б. в.], 1985. — 38 с.

10. Технічний паспорт циліндричного шліфувального верстата М1380 / Воронезький завод шліфувальних верстатів [б. в.], 1978. — 52 с.

11. Operating Manual Balancing Machine PHW-5000 / Schenck RoTec GmbH. — Darmstadt : Schenck RoTec, 2010. — 78 p.

12. Коваленко І.В., Петренко В.О. Розробка імітаційних моделей виробничих систем у Tecnomatix Plant Simulation // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2022. – № 4(79). – С. 45-52.

13. Technical Documentation: FANUC Robot M-2000iA Series / FANUC Corporation. — [Japan] : FANUC

14. Офіційний сайт DMG MORI: https://uk.dmgmori.com/

15. Офіційний сайт ABB Robotics: https://new.abb.com/products/robotics

16. Навчально-науковий комплекс "Інститут прикладного системного аналізу" НТУУ "КПІ". Виконання магістерської дисертації [Електронний ресурс]. – 2024. – URL: https://tm-mmi.kpi.ua/studentam/praktyka-ta-dyplomuvannia/vikonannja-magisterskoi-disertacini

17. ДСТУ 22400:2019 "Системи автоматизованого проектування. Моделювання технологічних процесів виробництва".

18. Європейська Бізнес Асоціація. Індустрія 4.0 в Україні: стан та перспективи розвитку [Електронний ресурс] / Європейська Бізнес Асоціація. – 2023. – Режим доступу: https://www.eba.com.ua/wp-content/uploads/2023/05/Industry-4-0-in-Ukraine-2023.pdf.

19. Український інститут майбутнього. Цифрова трансформація промисловості України: виклики та можливості [Електронний ресурс] / Український інститут майбутнього. – 2022. – Режим доступу: https://uifuture.org/publications/cifrova-transformaciya-promyslovosti-ukrayiny.

20. Державна служба статистики України. Статистична інформація щодо машинобудування та інвестицій у основний капітал [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/.

21. Петренко, В. О. Управління ризиками інноваційних проектів в умовах цифрової трансформації / В. О. Петренко, І. М. Сидоренко // Економіка та суспільство. – 2023. – № 47. – С. 112-118. – Режим доступу: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2456.

ДОДАТОК А

Таблиця 5. Порівняльний аналіз ключових показників ефективності (KPI)

Показник Ефективності (KPI)	Базова модель	Модерніз. модель	Абсолютна зміна	Відносна зміна
Загальний випуск, вал/місяць	15.9	23.8	+7.9	+49.7%
Середній час виробничого циклу, год.	118.5	79.2	-39.3	-33.2%
Коефіцієнт завантаженості обладнання, %:				
Токарно-фрезерний центр DMG Mori	-	78.5%	-	-
Токарний верстат 1А660	89.5%	-	-	-
Фрезерний верстат 6Р13Ф3	61.3%	-	-	-
Шліфувальний верстат М1380	39.7%	59.1%	+19.4%	+48.9%
Балансувальний верстат PHW-5000	12.5%	18.7%	+6.2%	+49.6%
Середній рівень WIP, дет.	5.7	2.9	-2.8	-49.1%

Розрахунок економічної доцільності проекту модернізації

Проведений аналіз завантаженості обладнання демонструє значне покращення балансування виробничої лінії після модернізації. Коефіцієнт нерівномірності завантаження, який є ключовим показником ефективності використання устаткування, розраховується за стандартною формулою, що враховує різницю між максимальним та мінімальним завантаженням, нормованою на середнє значення завантаження всієї лінії.

Для базової моделі розрахунок показує високий рівень нерівномірності, що свідчить про наявність "вузьких місць" у виробничому процесі. Особливо критичною була ситуація з токарним верстатом 1А660, завантаження якого досягало 89.5%, що практично є межею його виробничих можливостей. Одночасно балансувальний верстат використовувався лише на 12.5%, що свідчить про значні простої та неефективне використання ресурсів.

Розрахунок для базової моделі:

$$Z_{\text{сер}} = \frac{89.5\% + 61.3\% + 39.7\% + 12.5\%}{4} = 50.75\%$$

$$\Delta_{\text{баз}} = \frac{89.5\% - 12.5\%}{50.75\%} \times 100\% = 151.7\%$$

Отримане значення Δбаз свідчить про значну нерівномірність завантаження. Така різниця між максимальною та мінімальною завантаженістю призводила до періодичних простоїв, накопичення заготовок у чергах та зниження ефективності виробничого процесу.

Вплив модернізації

Після модернізації виробничої дільниці ситуація суттєво покращилася. Інтеграція токарно-фрезерного центру **DMG Mori** дозволила повністю усунути критичне перевантаження на токарній операції. Нове обладнання

взяло на себе частину функцій, раніше розподілених між кількома верстатами, що забезпечило:

- стабільне завантаження на рівні **78.5%**,
- скорочення черг між операціями,
- підвищення ритмічності та прогнозованості виробничого потоку,
- зменшення внутрішньовиробничих втрат часу.

Розрахунок для модернізованої моделі:

$$Z_{\text{сер}} = \frac{78.5\% + 59.1\% + 18.7\%}{3} = 52.1\%$$

$$\Delta_{\text{мод}} = \frac{78.5\% - 18.7\%}{52.1\%} \times 100\% = 114.8\%$$

Порівняльна оцінка

Порівняння показників до та після модернізації демонструє істотне підвищення збалансованості виробничого процесу:

$$\Delta_{\text{зниж}} = 151.7\% - 114.8\% = 36.9\%$$

Отже, нерівномірність завантаження обладнання зменшилася на **36.9%**, що підтверджує ефективність модернізації. Це не лише покращило загальну продуктивність лінії, а й забезпечило більш раціональне використання виробничих ресурсів, скорочення часу проходження виробу по лінії та підвищення стабільності виробництва.

Таблиця 6. - Вихідні економічні параметри

Параметр	Значення	Примітка
Капітальні витрати (CAPEX)	1 550 000 $	З таблиці 4
Додатковий випуск продукції	94.8 вал/рік	7.9 вал/міс × 12
Середня ціна реалізації	40 000 $/вал	Ринкова вартість
Собівартість виробництва	28 000 $/вал	З урахуванням матеріалів
Маржинальний прибуток	12 000 $/вал	Різниця ціни та собівартості
Економія на ФОП	60 000 $/рік	2 оператори × 3 зміни
Витрати на обслуговування	30 000 $/рік	Для нового обладнання

Основним джерелом економічного ефекту є додатковий прибуток від збільшення обсягів виробництва. Маржинальний прибуток на один вал розраховується як різниця між ціною реалізації та собівартістю виробництва. Для даного виробу вона становить 12 000 доларів, що відображає високу додану вартість продукції.

1. Додатковий прибуток від збільшення випуску:

Маржинальний прибуток на вал = 40 000 - 28 000 = 12 000 $

Додатковий прибуток = 94.8 × 12 000 = 1 137 600 $/рік

Важливим фактором економії є зменшення витрат на оплату праці. Впровадження автоматизованого обладнання дозволило скоротити 2 операторів, які працювали в три зміни. Однак частину економії компенсують додаткові витрати на обслуговування нового, більш складного обладнання.

2. Економія на операційних витратах:

Економія на ФОП = 60 000 $/рік

Чиста економія = 60 000 - 30 000 = 30 000 $/рік

Сумарний річний економічний ефект становить 1 167 600 доларів, що демонструє високу ефективність інвестицій у модернізацію.

3. Сумарний річний економічний ефект:

Сумарний ефект = 1 137 600 + 30 000 = 1 167 600 $/рік

Термін окупаємості є одним з ключових показників ефективності інвестицій. Для даного проекту він становить 1.33 роки, що еквівалентно 16 місяцям. Такий термін окупаємості вважається дуже привабливим для промислових інвестицій.

Термін окупаємості:

PP = CAPEX / Річний ефект = 1 550 000 / 1 167 600 ≈ 1.33 роки

PP_міс = 1.33 × 12 = 16 місяців

Рентабельність інвестицій показує, який відсоток прибутку отримується на кожну вкладену грошову одиницю. ROI 75.3% свідчить про високу прибутковість проекту.

Рентабельність інвестицій (ROI):

ROI = (Річний ефект / CAPEX) × 100% = (1 167 600 / 1 550 000) × 100% = 75.3%

Чиста приведена вартість розрахована на період 5 років з використанням ставки дисконтування 12%, що відповідає середньогалузевому рівню. Позитивне значення NPV у розмірі 2 658 000 доларів підтверджує економічну доцільність проекту.

Чиста приведена вартість (NPV) за 5 років:

NPV = 1 167 600 × 3.6048 - 1 550 000 = 2 658 000 $

Скорочення виробничого циклу на 39.3 години дозволяє отримати додатковий економічний ефект за рахунок прискорення обігу коштів. Цей ефект розрахований з урахуванням вартості капіталу та частки додаткового прибутку, яка може бути реінвестована.

Додаткова економія від прискорення обігу коштів:

Економія від скорочення циклу = (39.3 год / 118.5 год) × 1 137 600 $ × 0.15 = 88 700 $/рік

Таблиця 7. - Зведений аналіз економічної ефективності

Показник	Значення	Інтерпретація
Сумарні капітальні витрати (CAPEX)	1 550 000 $	Інвестиція в модернізацію
Річний економічний ефект	1 167 600 $	Сумарна річна вигода

Показник	Значення	Інтерпретація
Простий термін окупаємості	1.33роки	Високошвидка окупаємість
Рентабельність інвестицій (ROI)	75.3%	Висока прибутковість
Чиста приведена вартість (NPV)	2 658 000 $	Висока інвестиційна цінність
Економія від зменшення WIP	78 400 $	Вивільнення оборотних коштів
Зниження нерівномірності завантаження	36.9%	Покращена балансування лінії
Приріст продуктивності	49.7%	Значне зростання випуску
Скорочення виробничого циклу	33.2%	Прискорення виробництва