КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інформаційних систем та технологій

Спеціальність 126 – Інформаційні системи та технології
Освітня програма «Програмні технології інтернет речей»

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

«Система моніторингу та прогнозування технічного стану виробничого обладнання з використанням IoT пристроїв для харчової промисловості»

Студента 2-го курсу групи ІРма-21

Андрія ДЕМЧЕНКО
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис студента)

Науковий керівник:

Д.т.н., доцент
(науковий ступінь, вчене звання)

Олександр КУЧАНСЬКИЙ
(прізвище, ім'я, по батькові)

(дата) (підпис)

Попередній захист:

(Висновок: "До захисту в Екзаменаційній комісії")

Завідувач кафедри інформаційних систем та технологій _____ Олександр КУЧАНСЬКИЙ _____

(підпис) (прізвище, ініціали) (дата)

Київ 2022

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Факультет інформаційних технологій

Кафедра Інформаційні системи та технології

Освітній рівень Магістр

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

Освітня програма Програмні технології інтернет речей

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Д.т.н., доцент Олександр КУЧАНСЬКИЙ

_____

«__» _____ 2022 року

ЗАВДАННЯ
НА ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Студент:

Група: **ІРма-21**

1. **Тема дипломної роботи**: «Система моніторингу та прогнозування технічного стану виробничого обладнання з використанням IoT пристроїв для харчової промисловості».

Затверджена протоколом засідання кафедри ІСТ №4 від «28» листопада 2021р.

2. **Строк подання студентом готової роботи** – «11» травня 2021 р.

3. **Цільова установка та вихідні дані до роботи**: На основі заморожувального тунелю одноразового часу утримання створити модель кастомізації комп'ютеризованої системи управління технічним обслуговуванням із можливістю застосування технологій предикативної аналітики, розробка критеріїв прийнятності цієї системи.

4. **Зміст роботи**: аналіз ключових технологій індустрії 4.0 та виділення ключових критерії прийнятності системи моніторингу технічного стану, аналіз процесів життєвого циклу заморожувального тунелю, сценаріїв його використання, виділення ключових критичних компонентів обладнання та взаємозв'язків між ними, побудова схеми оснащення критичного компоненту обладнання датчиком для моніторингу його технічного стану для застосування концепції предикативного технічного обслуговування до тунелю заморожування, побудова моделі кастомізації системи до вимог Індустрії 4.0, на основі зібраної інформації щодо технічного стану компонентів обладнання та критеріїв прийнятності системи моніторингу.

5. **Перелік графічного матеріалу**:

Зображення ключових фізичних компонентів заморожувального тунелю, приклади роботи програмних систем заморожувального тунелю, приклади процесів збору та передачі даних системи обслуговування.

6. **Календарний план виконання роботи:**

Етапи виконання дипломних робіт	**Термін виконання**
1. Вибір теми дипломної роботи	28.10.21
2. Наказ про затвердження тем дипломних робіт та призначення наукових керівників	28.11.21
3. Формування переліку нормативних матеріалів, літератури з проблематики дипломної роботи	17.01.22
4. Розробка плану дипломної роботи і його погодження з науковим керівником	07.02.22
5. Написання I розділу дипломної роботи	11.03.22
6. Написання II розділу дипломної роботи	27.03.22
7. Написання III розділу дипломної роботи	20.04.22
8. Написання IV розділу дипломної роботи	30.04.22
8. Підготовка висновків і пропозицій	06.05.22
9. Попередній захист дипломної роботи	11.05.22

Дата видачі завдання «____» _____ 2021 р.

Керівник роботи: д.т.н., доцент Олександр КУЧАНСЬКИЙ _____ (підпис)

Завдання прийняв до виконання:

студент групи **ІРма-21** Андрій ДЕМЧЕНКО _____(підпис)

АНОТАЦІЯ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інформаційних систем та технологій

Освітня програма «Програмні технології інтернет речей»

Дипломна робота магістра Андрія ДЕМЧЕНКА

Тема роботи: «Система моніторингу та прогнозування технічного стану виробничого обладнання з використанням IoT пристроїв для харчової промисловості».

Мета дипломної роботи магістра – розробка моделі комп'ютеризованої системи управління технічним обслуговуванням із підтримкою функцій предикативної аналітики з можливістю її застосування у харчовій промисловості на основі тунелю заморожування одноразового часу утримання.

Об'єкт дослідження – заморожувальний тунель одноразового часу утримання.

Предмет дослідження – комп'ютеризована система управління технічним обслуговуванням з функціями предикативної аналітики.

Методи дослідження – системний аналіз компонентів заморожувального тунелю, сценаріїв його використання та обслуговування. Розробка критеріїв прийнятності системи. Застосування технологій предикативної аналітики до критичного компоненту досліджуваного обладнання з метою передбачення його технічного стану та збоїв. Застосування зібраної інформації для побудови моделі кастомізації системи.

Теоретичне підґрунтя – технічна документація, системний аналіз.

Методологічною базою роботи є загальнонаукові принципи проведення досліджень, теоретичні й методичні основи системного підходу, методи експертних оцінок.

Дипломна робота складається зі змісту, вступу, основної частини, яка включає три розділи, висновків, списку використаних джерел, та додатків. Всього 118 сторінок.

Ключові слова: заморожувальний тунель, предикативне обслуговування, Індустрія 4.0, система моніторингу та прогнозування технічного стану.

ANNOTATION

TARAS SHEVCHENKO KYIV NATIONAL UNIVERSITY

Faculty of Information Technology

Department of Information Systems and Technologies

Educational program "Software technologies of the Internet of Things"

Andrii Demchenko’s Master’s thesis

R&D: "System for monitoring and forecasting the technical condition of production equipment using IoT devices for the food industry."

The purpose of the master's thesis is develop of a model of computerized maintenance management system with support of predictive analytics functionality for its application in the food industry on the basis of a single retention time freezing tunnel.

The object of research - single retention time freezing tunnel.

The subject of research - computerized maintenance management system with predictive analytics functions.

Research methods - system analysis of the components of the freezing tunnel, scenarios of its use and maintenance. Development of system acceptance criteria. Application of predictive analytics technologies to the critical component of the studied equipment in order to predict its technical condition and failures. Application of the collected information to build a system customization model.

Theoretical basis - technical documentation, systems analysis.

The methodological basis of the work - general scientific principles of research, theoretical and methodological foundations of a systematic approach, methodological expert assessments.

Thesis consists of content, main part, which includes three sections, conclusions, list of used sources and annex. 118 pages.

Keywords: Freezing tunnel, predictive maintenance, Industry 4.0, Maintanance monitoring and prediction system

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ **11**

ВСТУП **12**

РОЗДІЛ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЙ ІНДУСТРІЇ 4.0 ..... **15**

1.1 Постановка задачі 15

1.1.1 Підоснова *15*

1.1.2 Проблематика *16*

1.1.3 Структура кваліфікаційної роботи *17*

1.2 Індустрія 4.0 17

1.2.1 Кіберфізичні системи *18*

1.2.2 Інтернет речей (IoT) *20*

1.2.3 Хмарні обчислення *24*

1.2.4 Big Data *25*

1.3 Предикативна аналітика (аналітика Big Data) 26

1.3.1 Машинне навчання *27*

1.3.1.1 Типи машинного навчання 28

1.3.1.2 Критерії вибору алгоритму 30

1.3.1.3 Штучні нейронні мережі 31

1.4 Предикативне обслуговування 31

1.4.1 Модель предикативного обслуговування та вимірювання продуктивності *34*

1.5 Комп'ютеризована система управління технічним обслуговуванням 37

1.5.1 Потреби, вимоги та узагальнення критеріїв прийняття для системи КСУТО *42*

Висновки до розділу 1 43

РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ, ЗБІР ДАНИХ ТА СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ КОМПОНЕНТІВ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ **44**

2.1 Обраний об'єкт дослідження 44

2.2 Системний аналіз для обраної фізичної системи 46

2.2.1 Процеси життєвого циклу *46*

2.2.1.1 Ключові зацікавлені сторони 46

2.2.2 Системний контекст *47*

2.2.3 Збій системи *47*

2.2.4 Система автоматизації та управління *49*

2.2.4.1 Датчики 49

2.2.4.2 Програмований логічний контролер 50

2.2.4.3 Людино-машинний інтерфейс 51

2.2.4.4 Комунікаційний інтерфейс 52
2.2.4.5 Холодильна система 52
2.2.4.6 Система системи 53
2.2.4.7 Системні операції 54
2.2.4.8 Сценарії обслуговування 56
2.2.4.9 Відмови, режими і механізми 59
Висновки до розділу 2 60
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ДЛЯ ПРОГРАМИ ПТО ТА СИСТЕМИ КСУТО **62**
3.1 Програма прогнозування здоров'я та продуктивності 62
3.1.1 Аналіз основних компонентів *64*
3.1.2 Емпірична модова декомпозиція *65*
3.1.3 Коефіцієнт Нейкоефа *67*
3.1.4 Адаптивний поріг *68*
3.1.5 Використання вейвлет-схем знешумлення *68*
3.1.5 Порівняння різних схем знешумлення на основі штучних нейронних мереж *70*
3.2 Загальна архітектура розумної системи предикативного обслуговування 72
3.3 Системний аналіз комп'ютеризованої системи управління технічним обслуговуванням 74
3.3.1 Контекст системи КСУТО *74*
3.3.2 Реєстр активів *75*
3.3.3 Наряд на роботу *76*
3.3.4 Планування профілактичного обслуговування *78*
3.3.5 Управління запасами *79*
3.3.6 Бюджетування та планування *80*
3.3.7 Звіти про технічне обслуговування *80*
Висновки до розділу 3 82
РОЗДІЛ 4. ВИДІЛЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ПОТЕНЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КСУТО ТА ЇЇ КАСТОМІЗАЦІЯ **84**
4.1 Критерії оцінки КСУТО 84
4.2 Існуючі альтернативи програмного забезпечення КСУТО 84
4.2.1 SAP *84*
4.2.2 IFS *85*
4.2.3 IBM Maximo *85*
4.2.4 INFOR LN *85*
4.3 Кастомізація потенційної системи КСУТО 86
Висновки до розділу 4 91

ВИСНОВОК **92**
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ **93**
ДОДАТОК А **100**
ДОДАТОК Б **102**
ДОДАТОК В **103**
ДОДАТОК Г **104**
ДОДАТОК Ґ **106**
ДОДАТОК Д **108**

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Умовне позначення	**Розшифрування**
ОЧУ	Одноразовий час утримання
КСУТО	Комп’ютеризована система управління технічним обслуговуванням
ТО	Технічне обслуговування
ППО	Планування профілактичного обслуговування
ПТО	Предикативне технічне обслуговування
КТО	Коррективе технічне обслуговування
ТОУ	Технічне обслуговування за умовами
ПЛК	Програмований логічний контролер
ЛМІ	Людинно-машинний інтерфейс
КФС	Кіберфізична система
IoT	Інтернет речей
IIoT	Індустріальний інтернет речей
МН	Машинне навчання
ШІ	Штучний інтелект
ШНМ	Штучні нейронні мережі
ІКТ	Інформаційно-комунікаційні технології
RFID	Радіочастотна ідентифікація
НПР	Номер пріоритету ризику
АОК	Аналіз основних компонентів
ФВР	Функції внутрішнього режиму
ЕМД	Емпірична модова декомпозиція
КН	Коефіцієнт Нейкоефа
АП	Адаптивний поріг
БПНМ	Багатошарова персептронна нейронна мережа

ВСТУП

Трансформація з Індустрії 3.0 на Індустрію 4.0 швидко зростає в кількох промислових секторах, де автоматизовані виробничі системи стали більше як кіберфізичні та передові виробничі системи. Інтернет речей (IoT), кіберфізична система, обчислювальний інтелект, когнітивні можливості та інші технології є ключовими для Індустрії 4.0. Останні розробки в техніках збору даних, таких як інтелектуальних датчиків, дали можливість ініціювати зміни з нижнього рівня складних фізичних систем. Кіберфізичні системи стали достатньо розумними для поєднання фізичного і цифрового світів. Когнітивні та обчислювальні можливості цифрових систем були використані для управління фізичним обладнанням з мінімальним або нульовим втручанням людини.

Трансформація на погляди Індустрії 4.0 є досить вимогливою для кількох галузей промисловості. Перетворення автоматизованого активу на кіберфізичний є складним завданням, оскільки оператори повинні переконатися, що їхній актив спочатку є «розумним», а потім розробити «розумні» операції з точки зору керування обслуговуванням та виконанням необхідних завдань. Розумний актив означає, що такий актив як, наприклад, машина повинен мати можливість надавати/обмінюватися даними про свою поведінку. «Розумні» операції з управління технічним обслуговуванням означають, що дані про активи будуть зберігатися, оброблятися і візуалізуватися в автоматизованому та когнітивному вигляді за допомогою кількох технологій, пов’язаних з автоматизацією робочих процесів, таких як: прогнозоване обслуговування та штучний інтелект.

З точки зору оператора, комп’ютеризовані системи планування ресурсів підприємства та системи управління технічним обслуговуванням, наприклад, SAP є найважливішою частиною всієї цифрової трансформації, оскільки більшість інших систем можуть бути надані постачальниками послуг. Однак операторам потрібно щодня працювати з КСУТО, і майже всі отримані дані з активу будуть зберігатися та представлятися через ці системи. КСУТО є основним інтерфейсом між оператором і всією цифровою виробничою

системою. Таким чином, оператори повинні мати можливість оцінити, яка КСУТО (оскільки доступно кілька комерційних систем) є найбільш економічно ефективною для їх застосування, підтримувати повноту бачення Індустрії 4.0 і надавати можливості для налаштування.

З огляду на ці потреби, метою цієї дипломної роботи є створення моделі комп'ютеризованої системи управління технічним обслуговуванням із можливістю застосування технологій предикативної аналітики та розробка критеріїв прийнятності цієї системи.

Завданням дипломної роботи є створення моделі кастомізації комп'ютеризованої системи управління технічним обслуговуванням із можливістю застосування технологій предикативної аналітики на основі заморожувального тунелю одноразового часу утримання, а також розробка критеріїв прийнятності цієї системи.

Актуальність роботи полягає у тому, що, на жаль, традиційна КСУТО стала лише базою даних, яка не відображала аналізу діяльності цехів у реальному часі. Організації не можуть оптимізувати використання комп'ютеризованих систем управління технічним обслуговуванням. Також сьогодні якість харчових продуктів є вкрай важливим параметром контролю в галузі товарів широкого вжитку. З підвищенням температури, якість харчових продуктів, що швидко псуються, стрімко зменшується. Позапланова поломка на етапі обробки призведе до втрати продукції, її якості, вартості робочої сили та вартості запасних частин, тому вкрай важливо підтримувати актив і заздалегідь визначити можливий збій. Через це розробка моделі системи прогнозування технічного стану виробничого обладнання є актуальною.

Об'єктом дослідження є заморожувальний тунель одноразового часу утримання.

Предметом дослідження є комп'ютеризована система управління технічним обслуговуванням з функціями предикативної аналітики.

З огляду на вимоги, для цієї роботи було обрано приклад електромеханічної системи, до якої можливо застосувати програму предикативного технічного обслуговування та відповідну КСУТО. На основі цієї розробки виділяються ключові критерії прийняття та аспекти налаштування для розробки економічно ефективної КСУТО та проводиться дослідження з прогнозування стану одного з критичних компонентів системи. Також, для модернізації обладнання для відповідності передовим вимогам виробництва було застосовано бачення Індустрії 4.0. У роботі було застосовано такі методи дослідження, як системний аналіз, щоб визначити, як обраний об'єкт дослідження можна модернізувати, щоб він став «розумнішим». Змодельовано програму предикативного обслуговування для вибраної системи на основі розумних рівнів обслуговування та змодельовано систему КСУТО для підтримки програми ППО, а також визначено ключові критерії прийнятності вибору КСУТО та аспектів налаштування, які необхідні для розробки економічно ефективної КСУТО.

Отриманий результат можливість модернізації існуючого на підприємстві виробничого обладнання та системи управління технічним обслуговуванням до вимог Індустрії 4.0 без їх повної заміни, що дозволить значно спросити процес переходу та здешевити його.

Положення, викладені у роботі пройшли апробацію на 88-й Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», що проводилась у м. Київ, 20 квітня 2022 р.

Публікація, пов'язана з роботою - Демченко А.В., Кучанський О.Ю «Використання технологій IoT для покращення енергоефективності у виробництві харчових продуктів»: зб. тез. 88-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», м. Київ, 20 квітня 2022р.

РОЗДІЛ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЙ ІНДУСТРІЇ 4.0

У цьому розділі висвітлюються постановка, а також теоретичні відомості та концепції, пов’язані із запропонованим рішенням проблеми. Окрім цього розглядаються ключові технології, пов’язані з баченням Індустрії 4.0.

1.1 Постановка задачі

1.1.1 Підоснова

Індустрія 4.0 – це ініціатива німецького уряду, спрямована на трансформацію майбутньої виробничої промисловості в Європі шляхом збільшення цифровізації та взаємозв’язку між продуктами, процесами та бізнес-моделями, а також перехід від автоматизованих і роботизованих систем (Індустрія 3.0) до кіберфізичних систем за рахунок цифрової реструктуризації всього виробничого процесу та ланцюга створення вартості[1]. Кіберфізичні системи пов'язують фізичний та цифровий світи. Завдяки когнітивним можливостям цифрового світу стає можливим розробляти розумні активи та розумні операції для керування передовими виробничими системами. Розумні активи мають функціональність взаємопов’язаних машин, тоді як розумні операції використовують оперативні дані для штучного інтелекту та предиктивної аналітики для покращення прийняття рішень.

Трансформація автоматизованих активів на кіберфізичні є складним завданням. Як підкреслюється у звіті Європейської комісії «Німеччина: індустрія 4.0», залучення рівня цеху є ключовим бар’єром у процесі трансформації[1]. Ця цифрова трансформація розумних активів і розумних операцій буде неможливою без впровадження розумної комп’ютеризованої системи управління технічним обслуговуванням (КСУТО), яка є важливою частиною системи управління ТО, оскільки кіберфізичні системи трансформують робочі процеси з нижнього рівня та мінімізують залежність людини від системи. Таким чином, типові системи баз даних і системи КСУТО на основі операторів є не дуже ефективними для управління розумними системами. Це вимагає зміни підходу до технічного обслуговування з превентивного на предикативний, коли відмові машини можна

було б запобігти до того, як вона станеться. Ця трансформація може бути здійснена за допомогою підходу, керованого даними (data-driven approach), за використання якого дані, зібрані розумними датчиками, можуть бути проаналізовані та використані для планування ТО. Цей підхід має розвинути обчислювальні та когнітивні можливості в КСУТО, щоб використовувати дані в реальному часі для прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

1.1.2 Проблематика

Відповідно до стандартів якості ISO 9000, якість харчових продуктів є дуже важливим параметром контролю в галузі товарів широкого вжитку[2]. З підвищенням температури, якість харчових продуктів, що швидко псуються, стрімко зменшується. Дуже важливо підтримувати та постійно контролювати температуру харчових продуктів протягом усього процесу постачання. Для більш тривалого зберігання харчових продуктів їх необхідно швидко заморозити (знизити температуру продукту нижче -25 C°) після збирання.

Цей процес глибокого заморожування може здійснюватись через тунель заморожування ОЧЗ, який може швидко заморожувати харчові продукти, такі як риба, креветки, м’ясо, морозиво, молочні продукти тощо протягом 2-3-годинного циклу. Позапланова поломка на етапі обробки призведе до втрати продукції, її якості, вартості робочої сили та вартості запасних частин, тому вкрай важливо підтримувати актив і заздалегідь визначити можливий збій. Ще одним важливим фактором, який слід враховувати, є виконання ремонтних робіт у морозильному тунелі за температури, нижчої за -25 C°, що являє собою дуже складну задачу. Вона вимагає обслуговування з мінімальною участю людини. Таким чином, мета цієї дипломної роботи полягає в тому, щоб дати відповідь на наступне питання: як систему КСУТО можна оцінити та налаштувати для харчової промисловості, щоб вона відповідала вимогам Індустрії 4.0?

Це питання в свою чергу призводить до трьох проблем розробки: розробка розумніших активів, розумнішої програми ПТО та розумнішої КСУТО.

1.1.3 Структура кваліфікаційної роботи

Ця дипломна робота була організована відповідно до методичних рекомендацій, наданих КНУ ім. Шевченка. Дипломну роботу поділено на три розділи. Розділ 1 висвітлює проблему, її підґрунтя та формулювання проблеми, а також теоретичні відомості, пов'язані з Індустрією 4.0, Інтернетом речей, предикативною аналітикою та КСУТО. Також у розділі 1 створюється таблиця, де визначається перелік загальних потреб та вимог до систем КСУТО. У розділі 2 проведено системний аналіз основних систем об'єкту дослідження, його виробничої потужності, режимів роботи та відмов та проведений аналіз FMECA для заморожувального тунелю ОЧУ згідно його основних фізичних компонентів, їх функцій та потенційних причин відмов. У розділі 3 проведено системний аналіз для програми ПТО та системи КСУТО, а також здійснено прогнозування стану одного з критичних компонентів ОЧУ з використанням чотирьох алгоритмів. Після цього описуються висновки виконання кваліфікаційної роботи.

1.2 Індустрія 4.0

Термін «Індустрія 4.0» (четверта промислова революція) вперше був продемонстрований у Німеччині на Ганноверському ярмарку[3]. Ця країна акцентує увагу на трансформації традиційних виробничих систем. В інших частинах світу подібні дослідницькі роботи відомі під різними назвами, такими як розумне виробництво (США, Китай) та розумні виробничі системи (Норвегія, Швеція та Фінляндія).

Індустрія 4.0 — це розширення традиційних виробничих систем до повної інтеграції фізичної, розширеної IT-системи, включаючи Інтернет. Різні етапи промислової еволюції від Індустрії 1.0 до Індустрії 4.0 (рис. 1.1), трансформація від першої промислової революції до четвертої промислової революції[4]. Можна побачити, що фундаментальні концепції, які ведуть до зростання в кожному поколінні, тісно пов'язані з критичними ідеями автоматизації,

самоналаштування та самодостатніх систем, які з часом поступово вдосконалюються.

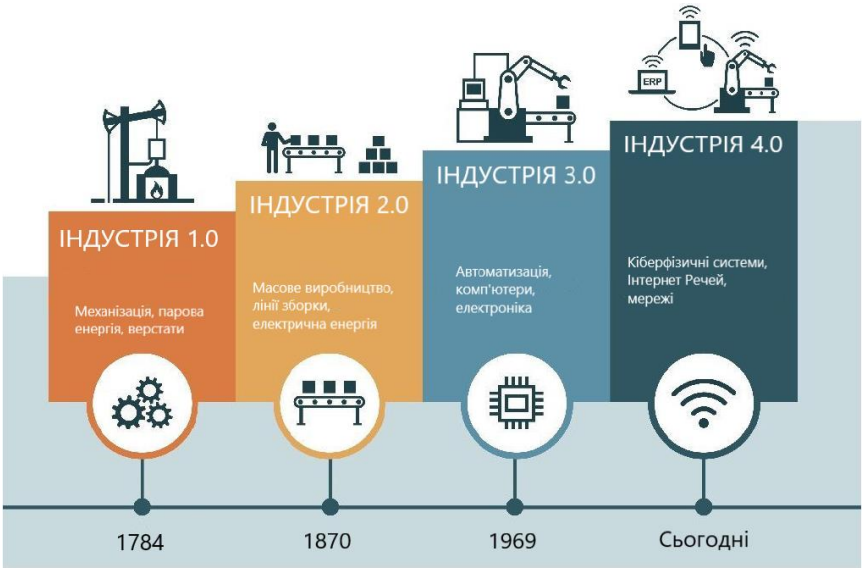


Рисунок 1.1 – етапи промислової революції

Індустрія 4.0 базується на концепції цифровізації всього ланцюга створення вартості та повної цифрової інтеграція інженерних систем і процесів.[5] Вона розробляє мережеву виробничу систему за допомогою ІКТ, підключення до Інтернету та зв’язку між пристроями, тобто машини до машини (M2M) і машини з комп’ютером (M2C). Індустрія 4.0 складається з чотирьох ключових компонентів:

— Кіберфізичні системи (КФС)

— Інтернет речей (IoT)

— Технології Big Data

— Предикативна аналітика

Все це взаємопов’язано і перетинається один з одним. Інтернет та підключення є ключовими факторами для впровадження Індустрії 4.0.

1.2.1 Кіберфізичні системи

Кіберфізична система була представлена у США в 2006 році та являє собою інтеграцію фізичних процесів та обчислювальних систем[6]. Її можна розглядати як базовий будівельний блок в системі, який з'єднує фізичний

компонент машини, що виконує дію з цифровими системами, такими як розімні датчики. Контроль параметрів фізичного процесу, таких як: температура, тиск, потік, сила тощо є основною вимогою цифрового перетворення. Розвиток вбудованої системи допоміг збільшити функціональність датчиків, наприклад RFID, розумних технологій, нанотехнологій. Датчики RFID мають перевагу безконтактного читання та запису. RFID-сенсорна система складається з пристрою (мітки), зчитувача міток з антеною та передавачем і хост-системи для зберігання даних[7].

Тег пристрою відстежує і зберігає показники фізичних компонентів, пристрій для зчитування тегів передає дані хост-системі за допомогою безконтактного середовища (радіохвилі, мікрохвилі). Збір даних в режимі реального часу є основою КФС з інтеграцією зв'язку, обчислень та керування фізичними системами. Ключові елементи КФС (рис. 1.2):

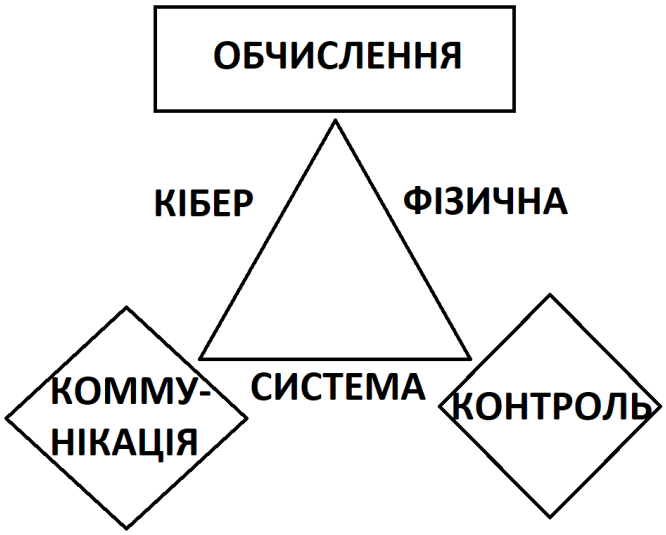


Рисунок 1.2 – ключові елементи кіберфізичних систем

Технологія RFID підходить для визначення робочих параметрів машини в режимі реального часу. Вона може передавати та приймати дані на відстань до 12 метрів. Очікується, що світовий ринок міток радіочастотної ідентифікації (RFID) зросте з 9,43 мільярда доларів у 2021 році до 10,31 мільярда доларів у 2022 році при сукупному річному темпі зростання (CAGR) у 9,4%[8].

КФС фокусується на цифровій частині виробничої системи та складається з двох основних функцій:

— Отримання даних у реальному часі, взаємодія та зв'язок між фізичним і цифровим світами;
— Переведення інтелектуальних обчислень та когнітивних рішень, здійснюваних у цифровому світі, у фізичний світ.

Взаємодія між фізичною та цифровою системами (рис. 1.3):

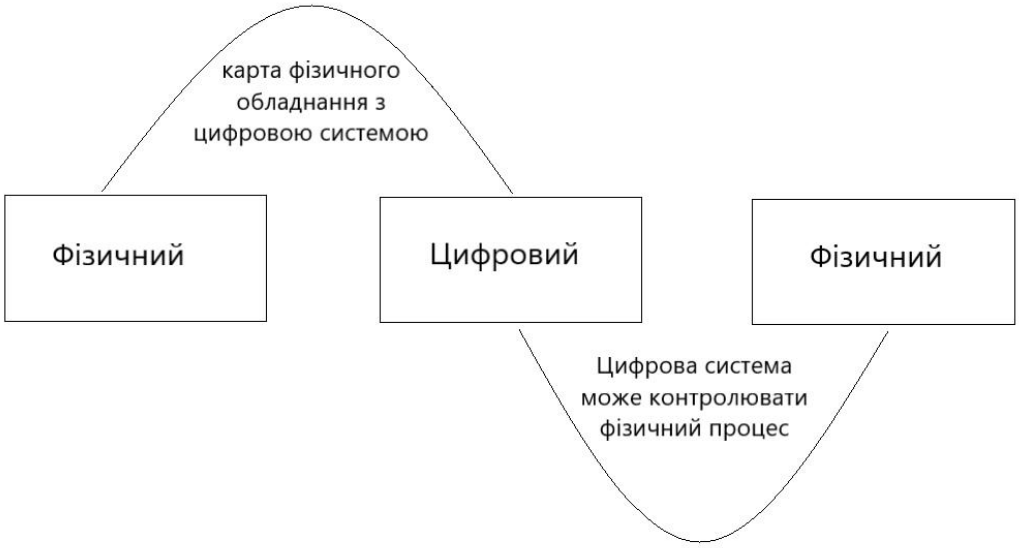


Рисунок 1.3 взаємодія фізичної та цифрової систем

1.2.2 Інтернет речей (IoT)

Лабораторія Auto-ID в Массачусетському технологічному інституті придумала термін «Інтернет речей» «IoT» і веде своє коріння до 1999 року.[9] Термін «Інтернет речей» стосується бездротового зв’язку між датчиками та комп’ютерними пристроями через Інтернет. Його можна зрозуміти з двох точок зору - орієнтованої на Інтернет і на речі. Перша - Інтернет, що підключає велику кількість пристроїв, а друга являє собою велику кількість речей або пристроїв[10]. Кожен пристрій можна ідентифікувати за допомогою унікальної IP-адреси та мати можливість з’єднуватись з ним через Інтернет за допомогою стандартного протоколу зв’язку. З винаходом IPv6 4,3 мільярди пристроїв можуть підключатися через Інтернет за допомогою унікальних IP-адрес.

Інтернет речей є ключем до вдосконалення автоматизації виробничого процесу. Наприклад, дистанційний моніторинг і контроль технологічного обладнання та машин через кіберфізичні системи IoT дозволяє людині та машині бути з'єднаними в цілісну виробничу систему.

IoT дозволяє розподіленим КФС (датчики RFID) підключатися через Інтернет і працює за принципом обчислювальної концепції, в якій кожен фізичний компонент може представляти себе як цифрову систему і може підключатися, обмінюватись інформацією через Інтернет, а також ідентифікувати інші пристрої[11]. Зв'язок M2M та M2C смарт-сенсорів, бездротових датчиків, RFID-сенсорів –лише кілька прикладів його застосування.

Загальна модель IoT може бути представлена чотирьма «C», з'єднанням(connection), зв'язком(communication), обчисленнями(computation) та керуванням(control). Частини з'єднання та зв'язку ілюструються КФС, тоді як обчислення та керування є відмінними рисами IoT. Отже, IoT — це технічна архітектура КФС. У цій роботі була застосована передова архітектура, яка складається з семи рівнів для впровадження моделі IoT у виробничій промисловості. Сім рівнів Інтернету речей та їхні ключові функції (рис. 1.4). Можна побачити, що IoT — це підхід знизу-вгору та архітектура систематичного розгортання для розумних виробничих систем.

Рисунок 1.4 – Рівні архітектури IoT

Функції семи рівнів Інтернету речей пояснюються наступним чином:

Прикладний рівень(Application level): складається з фізичних систем та їх компонентів, таких як: двигуни, коробки передач, конвеєри, роторні системи.

Рівень сприйняття(Perception level): складається з вимірювальних датчиків і перетворювачів для моніторингу фізичних параметрів. Ці датчики виявляють зміну різних параметрів, кількостей і подій. Ці сигнали передаються в систему ПЛК для контролю та моніторингу[12].

Рівень підключення/передачі(Transmission level): дані від датчиків передаються до служби зберігання даних. Така передача даних може бути дротовою або бездротовою. Дані зазвичай зберігаються на хмарних серверах або локальних сховищах.

Рівень перетворення(Conversion level): дані, отримані від рівня сприйняття, не готові для аналізу. Їх потрібно очистити та обробити для кращого прийняття рішень. У рівні перетворення дані з пристроїв рівнів сприйняття перетворюються в потрібний формат (структуровані дані), після чого вони стають готовими до використання для аналітики на обчислювальному рівні. На

цьому кроці створюються різні типи інтерфейсів між різними типами джерел даних[12], наприклад, інтеграція архівних даних і даних у реальному часі для певного вимірювального датчика. Етапи рівня перетворення даних (рис. 1.5). Цей рівень виконує попередню обробку даних і скорочує час обробки на обчислювальному рівні. Перетворення даних є вкрай важливим для додатків реального часу.

Рисунок 1.5 – Кроки рівня перетворень.

Рівень обчислень(Computation level): обчислювальний рівень використовує алгоритми машинного навчання, щоб аналізувати поточний стан обладнання та робити майбутні прогнози щодо стану та поведінки машини.

Рівень пізнання(Cognition level): пізнання представляє знання, зібрані на вищих рівнях для підтримки прийняття рішень. На рівні пізнання обчислювальні дані використовуються для моніторингу та оптимізації параметрів процесу[12].

Рівень конфігурації(Configuration level): переміщення з кіберпростору до фізичного простору[12].

Є можливим використовувати функції збору даних, обчислювальні та когнітивні можливості рівнів IoT для автоматизації прийняття рішень щодо технічного обслуговування. Структура на основі IoT для розумної системи обслуговування (рис. 1.6)[12]. Ця структура використовує функціональні можливості КФС та архітектури IoT для автоматизації процесу обслуговування. Ці восьми рівневі структури можна розділити на три великі частини:

— Рівень прикладних програм;

— Рівень IoT;

— Рівень пізнання та конфігурації.

Прикладний рівень з’єднує фізичний світ із цифровим світом. Промисловий Інтернет речей використовує обчислювальні можливості обчислення та аналітики цифрового світу. Під час пізнання та конфігурації шари перетворюють розумне рішення у фізичний світ.

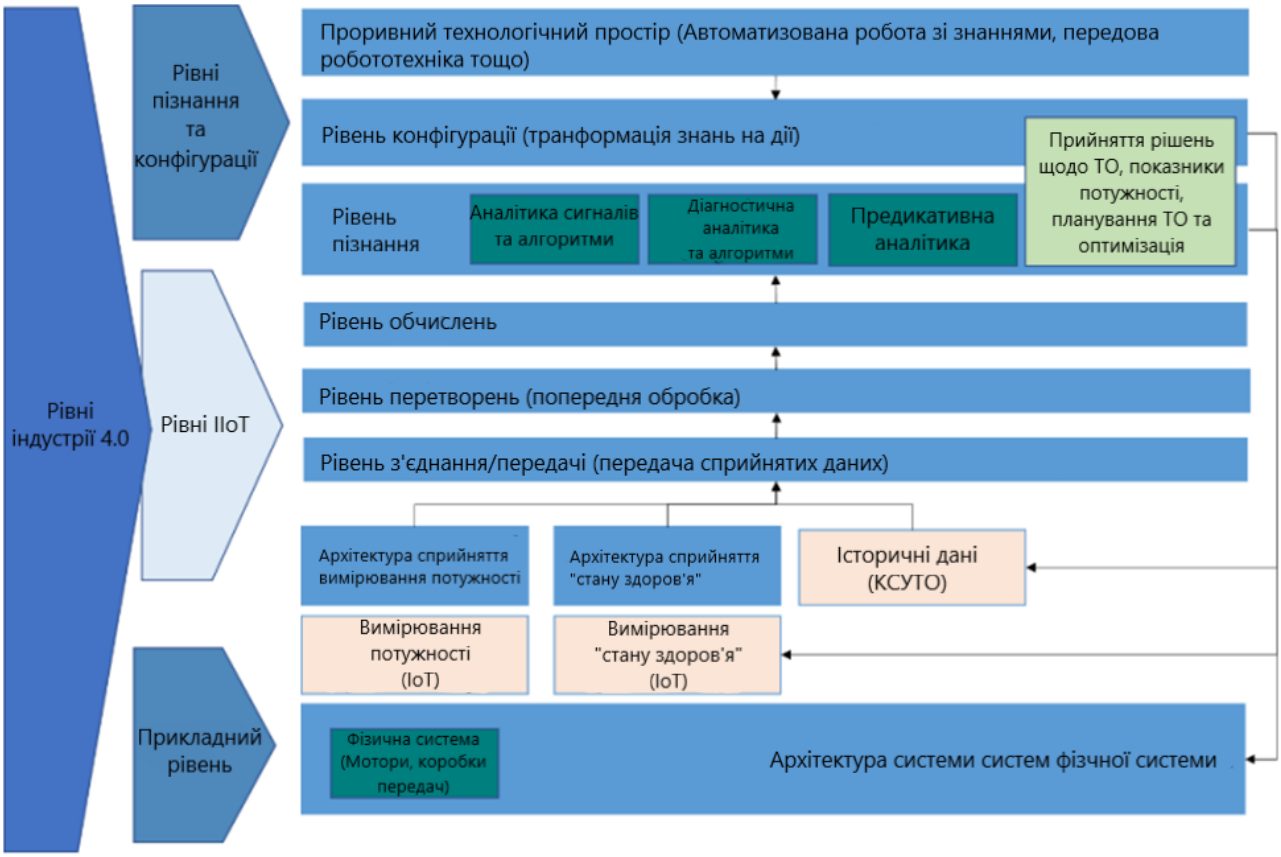


Рисунок 1.6 – структура для системи прогнозування

1.2.3 Хмарні обчислення

Хмарна технологія стала високопродуктивною, недорогою альтернативою розподіленої мережі. Вона забезпечує апаратні рішення віртуалізації. Віртуалізація: це технологія, яка абстрагує деталі фізичного обладнання та надає віртуалізовані ресурси для високорівневих додатків[13]. Вона забезпечує високошвидкісний доступ до даних і складну обчислювальну потужність для вирішення великомасштабних інженерних проблем через Інтернет. Інтернет є основою хмарних технологій.

Національний інститут стандартів і технологій (NIST) визначив хмарні технології так: «хмарні обчислення — це модель для забезпечення повсюдного, зручного мережевого доступу на вимогу до спільного пулу обчислювальних ресурсів, що налаштовуються (наприклад, мережі, сервери, сховище, програми та послуги), які можна швидко надати та випустити з мінімальними зусиллями керівництва або взаємодії з постачальником послуг» [14].

Завдяки хмарним технологіям підприємству не потрібно мати дороге обладнання для вирішення складних інженерних проблем. Натомість вони можуть придбати доступ до хмари та високопродуктивні обчислення як послугу - апаратне забезпечення як послуга (HaaS) і програмне забезпечення як послуга (SaaS). Хмарні обчислення включають апаратне сховище, платформу хмарних обчислень, яка в свою чергу включає операційні системи, середовище виконання програм, базу даних, розробку додатків, тестування, платформу розгортання. Відомими постачальниками IT-послуг, які пропонують хмарні послуги, є Microsoft, Google і Amazon.

1.2.4 Big Data

У виробничих системах величезна кількість даних генерується корпоративними ресурсами, такими як дані в режимі реального часу від інтелектуальних датчиків і RFID-сенсорів, виробничої системи, системи автоматизації та керування та систем КСУТО. Завдяки підключенню до Інтернету кожен компонент фізичної системи може мати можливість підключатися та спілкуватися на рівні M2M і M2C. Ці дані можна охарактеризувати за допомогою трьох «V» - об’єм(volume), швидкість(velocity) і різноманітність(variety)[15].

Джерела big data у системах обслуговування (рис. 1.7). Як показано на рисунку, у великому обсязі представлені дані безпосереднього обслуговування, наприклад: плани технічного обслуговування, наряди на виконання робіт, дані моніторингу стану. Висока швидкість вказує на високошвидкісні дані, які

генеруються розумними датчиками та перетворювачами в режимі реального часу. Висока різноманітність – це дані з різних джерел різних типів і різновидів.

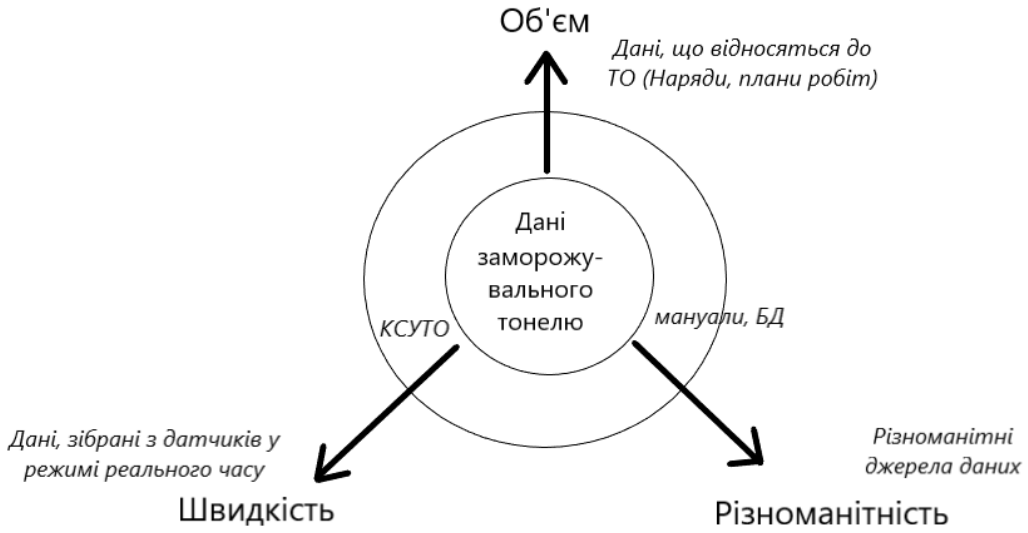


Рисунок 1.7 - Джерела Big Data у системі обслуговування

Дані з усіх цих джерел величезні та неоднорідні, вони генеруються з різних джерел у режимі реального часу та з високою швидкістю. Ці дані мають характеристики складності, децентралізації та швидкого переміщення. Ця велика кількість даних зберігається на хмарних серверах. З обмеженими аналітичними можливостями людини неможливо проаналізувати великий обсяг даних.

1.3 Предикативна аналітика (аналітика Big Data)

Розвиток високошвидкісного Інтернету, високопродуктивних процесорів і можливостей хмарних обчислень дозволили зберігати, обробляти та аналізувати велику кількість даних. Наприклад, дані, отримані від датчиків моніторингу стану, які можна використовувати для обробки, зберігання та аналізу для діагностики та прогнозування несправностей. Аналітика Big Data також відома як прогнозна аналітика. Простіше кажучи, предикативна аналітика — це ефективний підхід до перетворення незначимої великої кількості даних на значимі дані, які можуть використовуватися керівництвом для прийняття рішень.

Аналітика Big Data — це обчислювальна техніка для аналізу даних. Вона поєднує історичні дані та дані реального часу, щоб виявити приховані закономірності в наборах даних та використовує алгоритми машинного навчання, щоб виявляти ці закономірності, кореляції між різними джерелами даних і робити прогноз майбутніх подій, допомагати у прийнятті рішень і плануванні[16].

1.3.1 Машинне навчання

Машинне навчання — це підсфера штучного інтелекту, яка вчить машину навчатись як вирішувати певну проблему[17]. Артур Семюел описав машинне навчання як «здатність комп'ютера навчатися без явного програмування»[18]. Машинне навчання відрізняється від класичного підходу до моделювання. Різниця між класичним підходом моделювання та підходом машинного навчання (рис. 1.8). У машинному навчанні вхідні дані та бажані вихідні дані відомі, і розробляється модель, з використанням алгоритму машинного навчання для оптимізації результату.

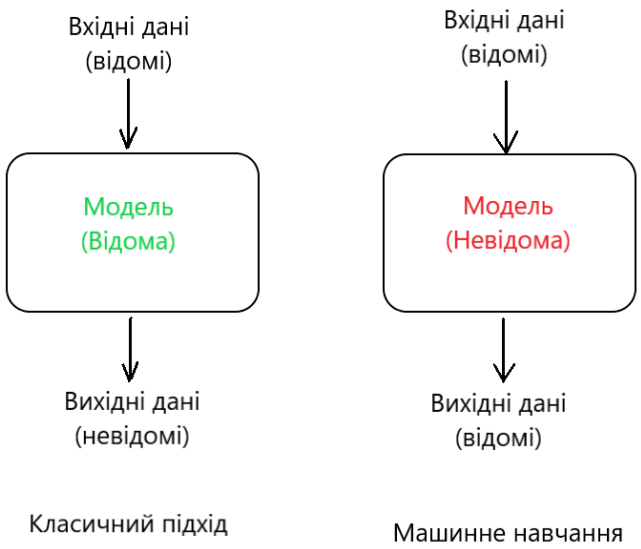


Рисунок 1.8 – класичний підхід та машинне навчання

Дані використовуються комп'ютером для розв'язання заданої проблеми та прогнозування події, яка може статися в реальному часі. Машинне навчання використовує запрограмовані алгоритми, які отримують та аналізують вхідні

дані для прогнозування вихідних значень у прийнятному діапазоні. Оскільки нові дані надходять до цих алгоритмів, вони навчаються та оптимізують свої операції для підвищення продуктивності, розвиваючи «інтелект» з часом[18].

1.3.1.1 Типи машинного навчання

Машинне навчання можна розділити на дві великі категорії; кероване та некероване машинне навчання.

а) Кероване навчання:

Кероване машинне навчання аналогічно традиційній освітній системі, в якій викладач направляє студента до процесу навчання. У навчанні під керівництвом вхідні дані та вихідні дані відомі. Передбачається, що алгоритм повинен знайти спосіб досягнення результатів, аналізуючи дані та виявляючи закономірності в них та вивчаючи спостереження.

Процес керованого машинного навчання (рис. 1.9). Алгоритми навчаються на позначених прикладах. Набір навчальних даних керує алгоритмом для досягнення бажаного результату. Цей процес триває до тих пір, поки алгоритм не досягне високого рівня точності[18]. Керівником може бути людина, яка перевіряє точність результатів. Для кращої точності результатів потрібні великі набори даних для позначеного набору навчальних даних.

Рисунок 1.9 - кероване машинне навчання.

Кероване машинне навчання можна далі поділити на три основні категорії: класифікація, регресія та прогнозуваннях[19]. У класифікації алгоритм машинного навчання класифікує вхідні дані на категорії, тобто нормальні та

ненормальні стани машини. У регресії алгоритм машинного навчання оцінює зв’язок між кількома змінними та їх залежностями. Дуже корисно прогнозувати залишок корисного використання обладнання в режимі реального часу. При прогнозуванні майбутні прогнози робляться на основі минулих даних і актуальних даних. Це є корисним для аналізу тенденцій.

Керований процес машинного навчання для процесу аналітики предикативного обслуговування з використанням керований навчання (рис 1.10). Предикативне обслуговування використовує алгоритми машинного навчання для виявлення прихованих закономірностей і кореляції в реальному часі та історичних даних. Для навчання моделі використовується підхід під керуванням машинного навчання[20]. Ця модель використовується для прогнозування збоїв у роботі обладнання.

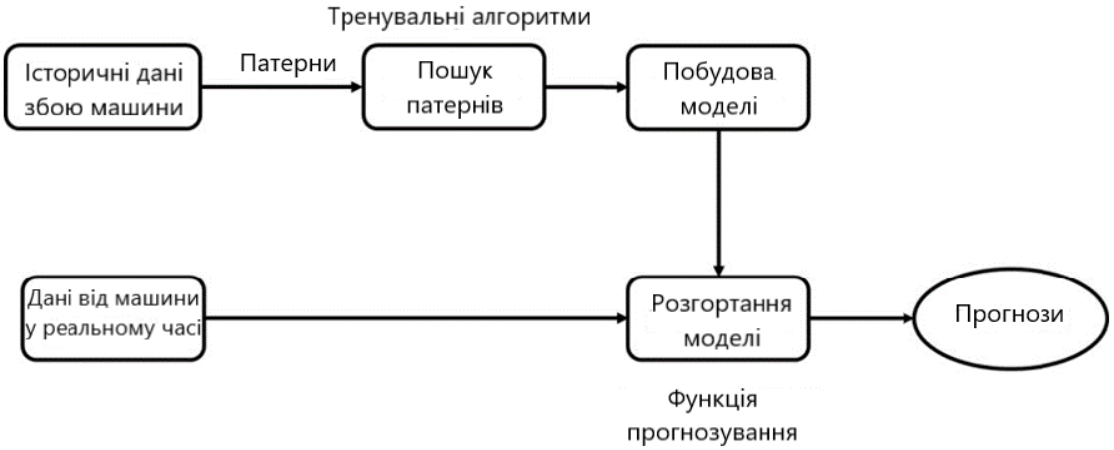


Рисунок 1.10 - Процес аналізу предиктивного обслуговування

б) Некероване навчання

У некерованому машинному навчанні алгоритм вивчає дані для визначення закономірностей. Немає ключа відповіді чи людини-оператора, щоб надати інструкції. Замість цього машина визначає кореляції та відносини, аналізуючи доступні дані. У процесі навчання без контролю за алгоритмом машинного навчання залишається інтерпретувати великі набори даних і відповідним чином адресувати ці дані[18].

Алгоритм намагається організувати ці дані якимось чином, щоб описати їх структуру. Це може означати групування даних у кластери або впорядкування їх таким чином, щоб вони виглядали більш організованими. У міру того, як алгоритм оцінює більше даних, його здатність приймати рішення на основі цих даних поступово покращується та стає більш витонченою[18]. Некероване навчання є вкрай корисним для категоризації даних і програм виявлення аномалій часових рядів. Процес некерованого машинного навчання (рис. 1.11).

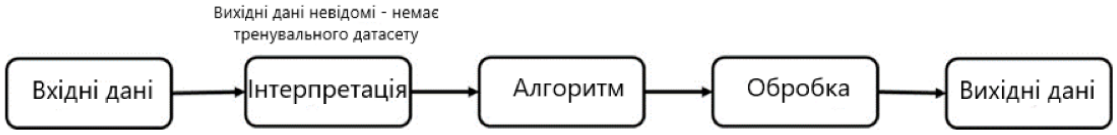


Рисунок 1.11 – процес некерованого машинного навчання

1.3.1.2 Критерії вибору алгоритму

Існує велика кількість ліцензованих і відкритих алгоритмів машинного навчання і залежно від характеру проблеми використовуються різні їх типи. Важливо відзначити, що різні алгоритми мають різні характеристики, вхідні дані, потужність обробки та точність виведення. Єдиний алгоритм машинного навчання не може вирішити всі типи проблем. Може знадобитися кілька алгоритмів для вирішення різних типів задач. Вибір алгоритму машинного навчання в основному ґрунтується на потребах бізнесу, і ціль включає вимоги до прогнозування, точності, часу та інвестиційних ресурсів, доступних для навчання алгоритму. Розмір і якість даних є ще одним критерієм вибору для алгоритму машинного навчання.

Вибір алгоритму часто є методом проб і помилок для досягнення бажаного результату. Існує два поширені методи перевірки алгоритмів: Перший - використання відомих або рекомендованих алгоритмів, які вже перевірені для забезпечення бажаного результату, а другий - використання операційних даних з процесу протягом 3-6 місяців і тонке налаштування моделі алгоритму за допомогою навчання під керівництвом. У разі машинного навчання без нагляду ця тривалість може бути збільшена до 6-12 місяців[21].

1.3.1.3 Штучні нейронні мережі

ШНМ є аналогом біологічних нейронних мереж (нейронів). Вони визначають нелінійну функціональну залежність між вхідними та вихідними даними. Нелінійна функція використовується для встановлення зв'язку між входами та виходами. Загальна конфігурація штучної нейронної мережі (рис. 1.12). Як показано на рисунку, вона складається з трьох шарів: вхідного шару, прихованого шару та вихідного шару[22]. Вхідні функції пов'язані з вхідним шаром, прихований шар пов'язаний з функціями нейронів і вихідними функціями. У моделях на основі даних нейронні мережі є найпоширенішими алгоритмами для оцінки терміну служби компонента, що залишився. Вони використовують підхід до навчання під керівництвом для навчання моделі.

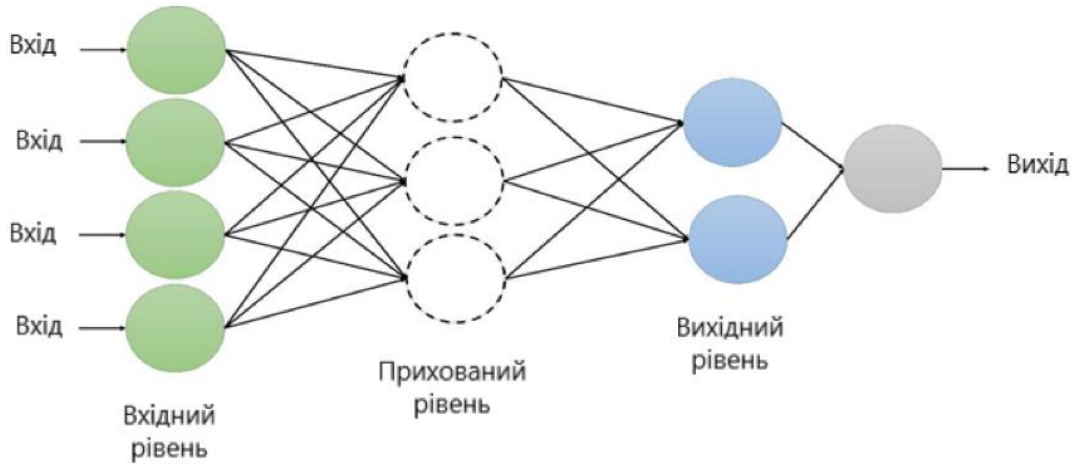


Рисунок 1.12 - Загальна модель штучних нейронних мереж

1.4 Предикативне обслуговування

Предикативне обслуговування — це промислове застосування предикативної аналітики. Можливість моніторингу в режимі реального часу предикативної аналітики може допомогти виявити збій ще на ранній стадії. Це значно зменшує позапланове технічне обслуговування та витрати на обладнання. Предикативне обслуговування допомагає передбачити поломку обладнання, спрогнозувати потреби в енергії, покращити експлуатаційні характеристики, зменшити витрати на технічне обслуговування та підвищити надійність активу. Наприклад, нерегулярна картина в сигналах датчиків може допомогти

передбачити схему відмови обладнання. Будь-яке відхилення від нормальної поведінки сигналу можна віднести до категорії збою.

Предикативне обслуговування використовує когнітивні міркування і приймає оптимальні рішення без людського втручання. Це може забезпечити майбутній прогноз про збій на дуже ранній стадії. У предикативній аналітиці працездатність активу визначається на основі умов експлуатації та рекомендацій щодо технічного обслуговування на основі прогнозування майбутніх збоїв. Правильно впроваджена система технічного обслуговування предикативної аналітики може значно знизити витрати на технічне обслуговування, зменшуючи непотрібне технічне обслуговування і проводити його коли це необхідно[23]. Усунення небажаного технічного обслуговування може зменшити вартість життєвого циклу активу та незаплановані простої. Стандартна процедура ISO для процесу моніторингу стану обладнання (рис. 1.13) [24]. Це починається з аналізу витрат і вигод для впровадження системи моніторингу стану. На першому етапі визначаються критичні компоненти, види відмов та параметри вимірювання. Далі іде діагностика несправностей і прогноз.

Діагностика полягає у виявленні несправності, що сталася в компоненті (або підсистемі), і виділенні та ідентифікації кореня несправності на основі даних, зібраних вбудованими датчиками. Прогноз полягає в оцінці часу, протягом якого компонент не зможе працювати у своїх заявлених специфікаціях, виходячи з його поточного стану, а також майбутнього навантаження та впливу навколишнього середовища, тобто прогнозування залишкового терміну експлуатації компонента, який є часто використовуваним параметром для оцінки надійності або можливості повторного застосування використовуваного компонента.

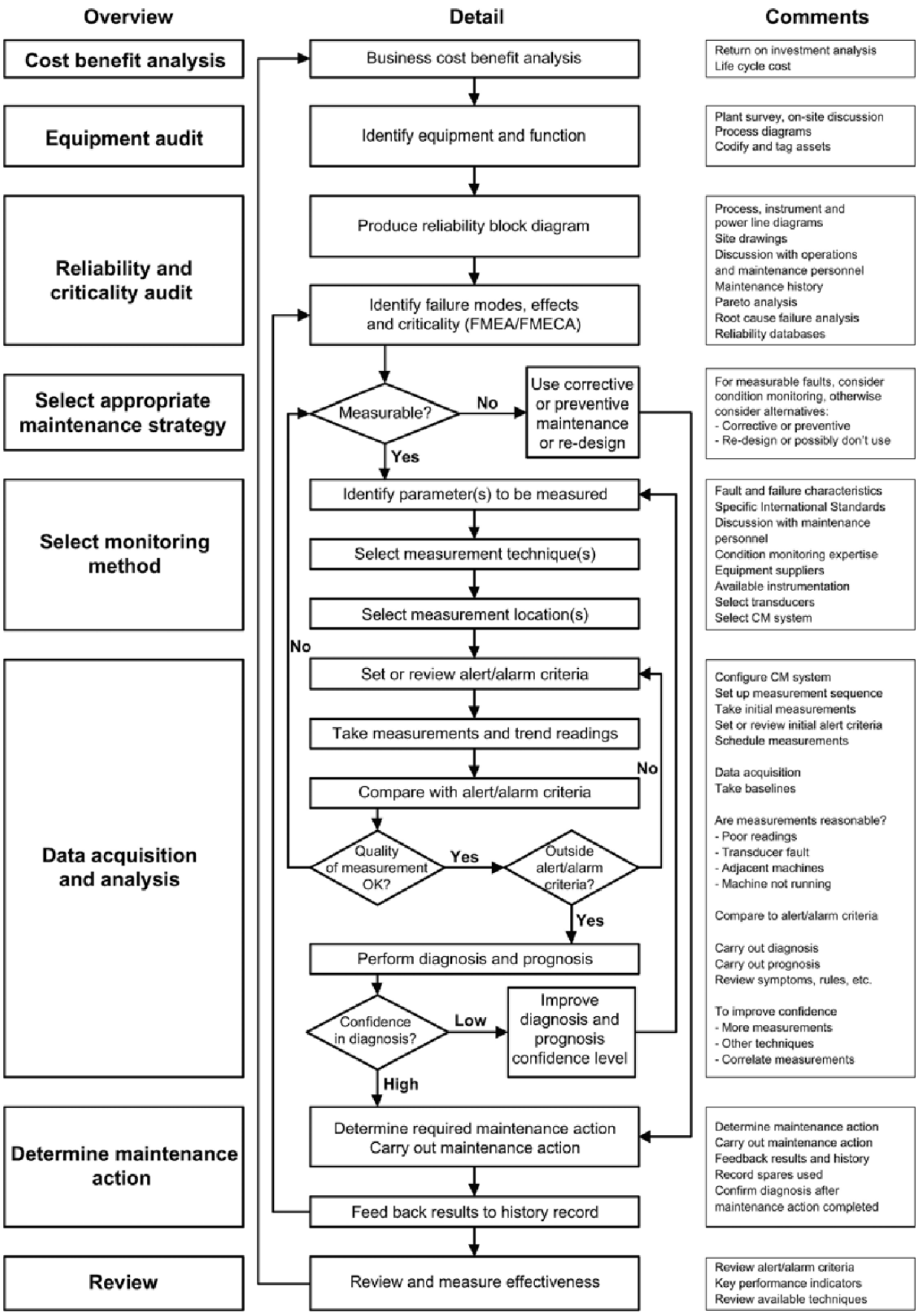


Рисунок 1.13 - стандартна процедура ISO для процесу моніторингу стану обладнання.

1.4.1 Модель предикативного обслуговування та вимірювання продуктивності

Модель предикативного технічного обслуговування та вимірювання продуктивності (рис. 1.14). Існує п'ять основних модулів розумної моделі предикативного обслуговування[25]:

— Збір даних;

— Маніпулювання даними;

— Діагностика та прогнозування;

— Ключові показники ефективності;

— Оптимізація.

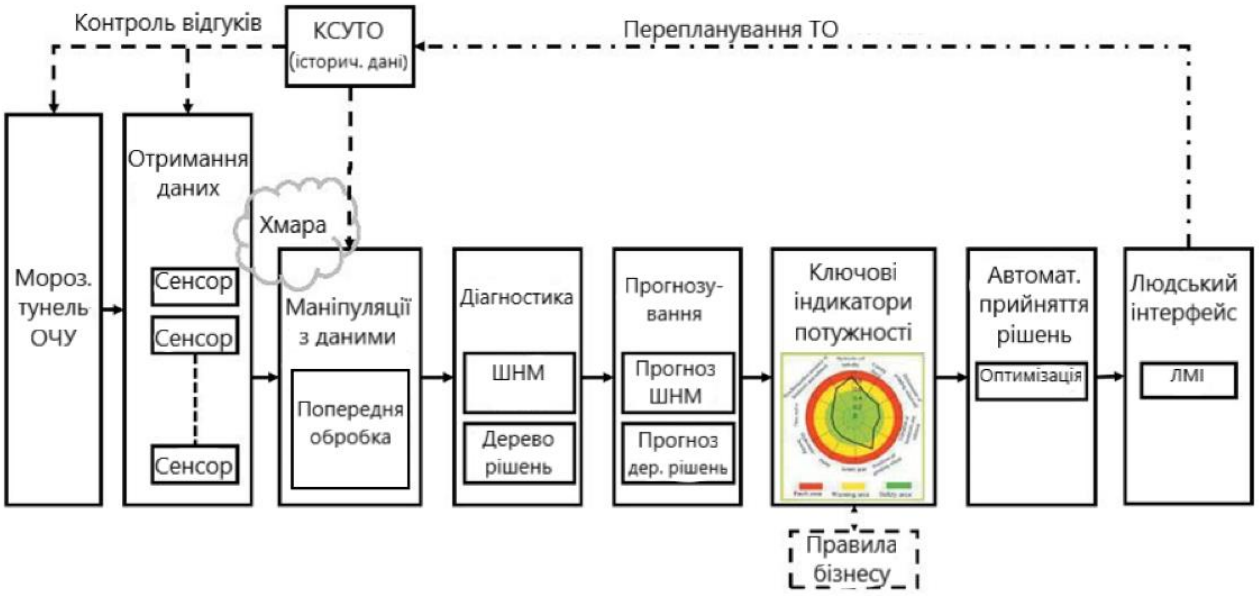


Рисунок 1.14 - Розумна модель предикативного обслуговування

а) Збір даних

Збір даних є першим кроком у впровадженні розумного предикативного обслуговування. На цьому етапі обираються відповідні датчики, які встановлюються на машині у відповідному місці, де можна генерувати оптимальний вихідний сигнал для стану обладнання. Ці дані збираються в режимі реального часу і зберігаються на хмарному сервері та потім перетворюються на домен, який містить максимум інформації про стан обладнання.

б) Маніпулювання даними

Дані, зібрані з кількох датчиків, недоступні для аналітики, вони мають деякі відсутні функції, такі як шум, зайві дані, неправильні показники датчиків, тому необхідно відсортувати, відфільтрувати та визначити пріоритети вихідних даних перед обробкою[26]. У модулі маніпулювання даними виконуються два кроки - попередня обробка і кондиціонування та вилучення ознак. При попередній обробці та формуванні сигналу покращуються характеристики та якість сигналу. Для цього використовуються різні методики, такі як: фільтрація, посилення, стиснення даних, видалення шумів. У виділенні функцій з попередньо обробленого сигналу витягуються важливі ознаки, які підкреслюють початковий збій. Як правило, є три домени, з яких можна витягнути ознаки в часовій області, частотній області та часово-частотній області. Вибір домену залежить від аналізу системи обладнання.

в) Діагностика і прогнозування

Сигнал, визначений у розділі маніпулювання даними, використовується для виявлення несправностей обладнання. Діагностика зосереджується на виявленні, ізоляції та ідентифікації несправності, тоді як прогностика зосереджується на прогнозуванні виникнення несправності у майбутньому. Доступні різні типи моделей діагностики несправностей та оцінки стану обладнання, які можна обрати на основі системного аналізу. Вибір моделі ґрунтується на наявності історичних даних та методів навчання - під наглядом і без нагляду. Метод діагностики та прогнозування несправностей (рис. 1.15):

Рисунок 1.15 - Модель діагностики та прогнозування несправностей.

Час є вирішальним фактором у прогнозі. Розраховується час, що залишився до відмови компонента, який також називають терміном служби, що залишився компонента чи машини. Розумна система предикативного технічного обслуговування обчислює залишок корисного використання компонента на основі моделі, керованої даними(data-driven model), а також аналізує зв’язок між терміном експлуатації, що залишився і станом компонента або машини.

г) Ключові показники ефективності

Деградація компонентів представляється графічно за допомогою радарної/павукової діаграми або діаграми ризику. Ключові показники ефективності масштабуються на основі серйозності, критичності, правил ведення бізнесу та безпеки. Ці діаграми допомагають операторам графічно уявити стан компонентів.

г) Оптимізація

Можна спроектувати високонадійне обладнання, але воно може бути неекономічним для промислового використання, оскільки висока надійність пов'язана з високою вартістю. Важливо обрати оптимальне рішення між

відмовами, вартістю та надійністю обладнання. Аналогічно, в розумному предикативному технічному обслуговуванні можна встановити правила діагностики та прогнозування технічного обслуговування, а також обмеження щодо відмов, вартості або надійності. Кожен фактор має свої наслідки, висока надійність призводить до низьких поломок обладнання, але високих витрат на обслуговування.

Найкращий підхід — знайти компроміс між відмовами обладнання, надійністю та вартістю обслуговування. Перепланування технічного обслуговування повинно здійснюватися з оптимальними інтервалами, коли найменші витрати призводять до низького рівня відмови обладнання та високої продуктивності та надійності. Концептуальна ідея представлена (рис. 1.16), щоб показати зв’язок між відмовами, надійністю та вартістю обслуговування.

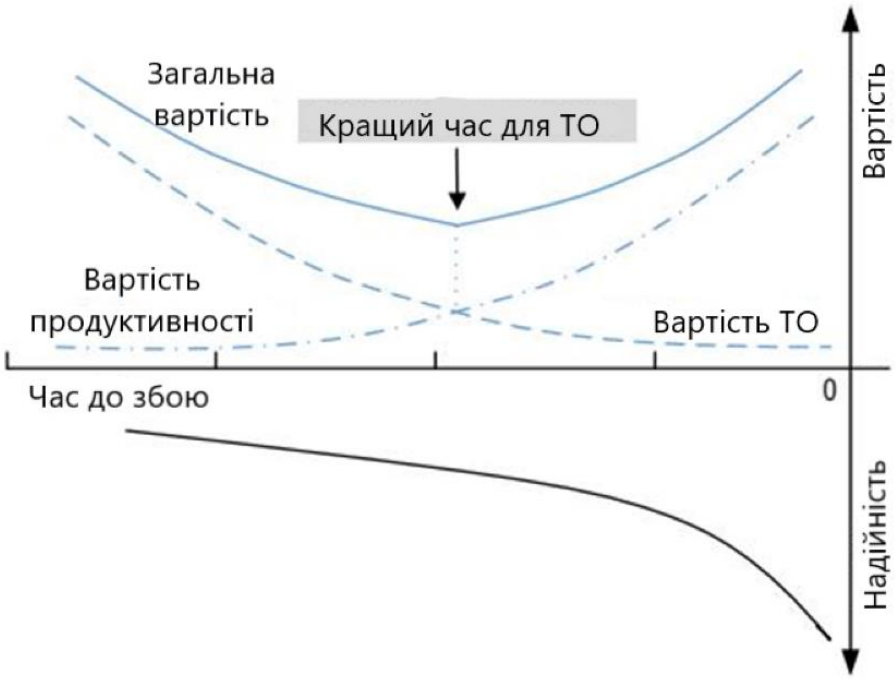


Рисунок 1.16 – взаємозв’язок між відмовами, надійністю та вартістю обслуговування

1.5 Комп'ютеризована система управління технічним обслуговуванням

Система технічного обслуговування, керована комп’ютером, — це інтегрований набір комп’ютерних програм і файлів даних, призначених для

надання користувачам економічно ефективних засобів керування величезними обсягами технічного обслуговування, контролю запасів та даних про закупівлю[27]. Важливо зазначити, що КСУТО є інструментом, який використовується для покращення ТО та пов'язаних з ним діяльностей, він не керує операціями з технічного обслуговування. Його також називають програмним забезпеченням для управління активами підприємства.

КСУТО є основною частиною системи управління інформацією про технічне обслуговування. Це програмна платформа для управління системою обслуговування, що допомагає в систематичному плануванні, виконанні та контролі заходів з технічного обслуговування[28]. Вона забезпечує економічно ефективний спосіб управління людськими та капітальними ресурсами. Ресурси, якими необхідно керувати на підприємстві (рис. 1.17). Обслуговування є складовою частиною підприємства та виробничої системи. Системи технічного обслуговування мають велике значення, оскільки обидві залежать від цього. Програмне забезпечення КСУТО допомагає керувати такими ресурсами, як робоча сила, запасні частини, інструменти, інформація, вартість та ремонтні роботи, що залучені стороннім виконавцем. Ці ресурси призводять до виробництва продукції, доступності, ремонтопридатності та безпеки активів.

Рисунок 1.17 - Модель входу та виходу для підприємства.

КСУТО – це також перехід від паперового робочого середовища до комп'ютеризованого цифрового сховища, що допомагає усунути відстеження та реєстрацію документів. Використання КСУТО надає наступні переваги[29]:

— Зменшення відставання в технічному обслуговуванні
— Зменшення витрат на технічне обслуговування
— Скорочення понаднормового часу
— Скорочення часу до ремонту
— Зменшення кількості контрактів на аутсорсингове технічне обслуговування
— Покращення планування технічного обслуговування
— Покращення відстеження обслуговування
— Покращення роботи техніків та інженерів з обслуговування
— Покращення планування техніків і керівників
— Користь у різних сертифікатах (ISO/харчових/BRC)

На основі функціональних можливостей КСУТО, програмний пакет згрупований у підсистему або модулі для утворення певного набору. Ці підсистеми можуть включати наступні можливості, але не обмежуються ними:

— Реєстр обладнання/активів
— Планування профілактичного обслуговування.
— Керування нарядами
— Управління людськими ресурсами
— Управління запасами

Реєстр обладнання/активів – це база даних усього обладнання на заводі. Усі заходи з технічного обслуговування пов’язані з активом. Таким чином, реєстр пов’язаний з усіма іншими базами даних, такими як ППО, інвентаризація та закупівля. Модуль планування профілактичного технічного обслуговування містить план ППО для зареєстрованих активів/обладнання на основі контрольного списку та частоти технічного обслуговування. Робочий наряд є основою системи КСУТО. Робочий наряд може бути створений за допомогою ППО або незапланованого обслуговування. Робочий наряд є серцем системи КСУТО (рис. 1.18)[29]. Усі модулі підключаються та оновлюються через

робочий наряд. Людські ресурси включають персонал і техніків, які виконують роботи з технічного обслуговування. Управління запасами включає складування, закупівлю та замовлення запасних частин.

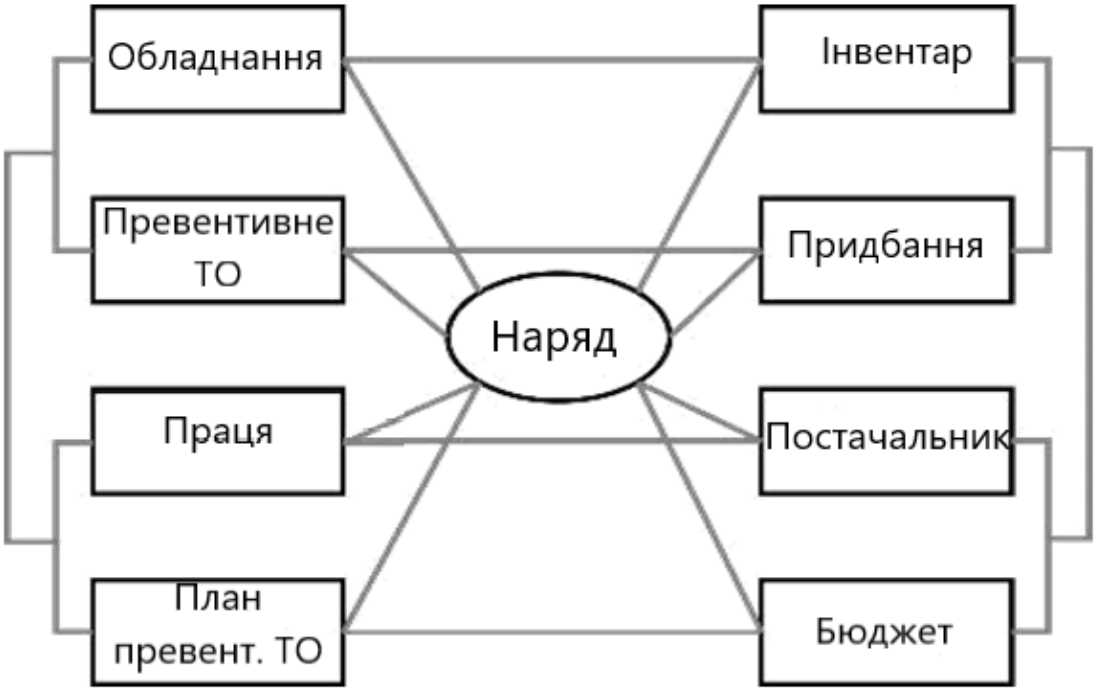


Рисунок 1.18 - Інтеграція різних модулів КСУТО

Програмне забезпечення КСУТО доступне в різноманітних економічно ефективних моделях, таких як програмне забезпечення на основі локальної мережі, ліцензоване програмне забезпечення або модель програмного забезпечення як сервіс (SaaS). Програмне забезпечення для локальної мережі закуповується компанією, і всі дані зберігаються на серверах компанії. Основне обслуговування частин здійснюється IT-персоналом компанії або за допомогою постачальника послуг. Веб-програмне забезпечення доступне за місячною або річною підпискою. Дані зберігаються в хмарному сховищі, а всі активації ТО виконуються постачальником програмного забезпечення. У наступне десятиліття великі організації віддадуть перевагу програмному забезпеченню КСУТО на основі локальної мережі, тоді як невеликі організації віддадуть перевагу рішенням на основі SaaS.

Із значним удосконаленням системи ІКТ та високошвидкісного Інтернету фокус на традиції, що КСУТО це лише база даних зменшується. Натомість він переходить у бік автоматизації прийняття рішень за допомогою аналітичних інструментів. На основі поточних і майбутніх ринкових тенденцій, інновацій та задоволення потреб клієнтів, нові тенденції в КСУТО або індустрії управління активами підприємства це[30]:

— Промисловий Інтернет речей;

— Хмарні обчислення;

— Big Data та розширена аналітика;

— Блокчейн;

— Мобільність і SaaS.

Промисловий Інтернет речей (IIoT) використовує промисловий Ethernet для концепції підключених пристроїв. Хмарні обчислення та аналітика Big Data включають обробку великої кількості даних для предиктивної аналітики за допомогою алгоритмів машинного навчання. Технологія блокчейн допомагає управлінню активами фіксувати всі транзакції та зміни в стані обладнання[31].

Постачальників програмного забезпечення КСУТО можна розділити на дві великі групи рівня 1 та рівня 2. Програмне забезпечення КСУТО рівня 1 включає SAP, IBM Maximo, Infor LN і IFS, а КСУТО рівня 2 можна виділити такими як Avantis (Schneider Electric), Ellipse (ABB), Oracle, Mainsaver, eMaint, Fiix тощо. Існує багато постачальників програмного забезпечення КСУТО, які працюють над впровадженням нових технологій у галузі управління активами. Звіт Gartner 2017 (рис. 1.19) масштабував відоме програмне забезпечення КСУТО, таке як Infor, IBM, SAP і IFS, на основі їхнього бачення та здатності виконувати мінливі умови ринку[32].

Рисунок 1.19 – звіт Gartner

1.5.1 Потреби, вимоги та узагальнення критеріїв прийняття для системи КСУТО

Для визначення основних вимог та потреб було проаналізовано інформацію з джерел та на її основі створено відповідну таблицю[33],[34],[35]. Загальні потреби та вимоги до систем КСУТО наведені у таблиці А.1 **Додатку А**:

Виходячи з потреб та вимог, описаних у таблиці А.1 **Додатку А**, можна виділити наступні критерії прийняття:

1. Програмне забезпечення КСУТО має бути здатним обробляти дані технічного обслуговування з різних джерел, наприклад: онлайн, офлайн, дані датчиків у реальному часі, дані поточного стану обладнання, історичні дані про несправності обладнання.
2. Повинно мати можливість отримувати дані в режимі реального часу від датчиків обладнання.

3. Програмне забезпечення повинно мати можливість зберігати велику кількість даних. Цього можна досягти за допомогою хмарного сховища локального сховища даних.
4. Для автоматичних операцій необхідно реалізувати підхід предикативної аналітики для автоматичного прийняття рішень без людського втручання.
5. Повинне підтримувати розумне предикативне обслуговування та вимірювання продуктивності.
6. Вихідні дані КСУТО мають бути представлені та візуалізовані у зведеному вигляді, звітах, діаграмах та нагадуваннях у реальному часі.

Висновки до розділу 1

У першому розділі роботи було проведено огляд теоретичних відомостей про такі поняття як: Індустрія 4.0, кіберфізичні системи, інтернет речей, хмарні обчислення та Big Data, а також технологій, пов’язаних з предикативним обслуговуванням. Базовий теоретичний аналіз КСУТО призвів до визначення необхідних технічних функцій та структуризації загальних потреб та вимог до систем КСУТО. Серед них було виділено те, що програмне забезпечення має бути здатним обробляти дані технічного обслуговування з різних джерел (онлайн, офлайн, дані датчиків у реальному часі, тощо), отримувати дані в режимі реального часу від датчиків встановлених на обладнанні, а також зберігати велику кількість цих даних, чого можна досягти за допомогою використання хмарних середовищ. Окрім цього обов’язковою є підтримка розумного предикативного обслуговування та вимірювання продуктивності, а також підходів предикативної аналітики для автоматичного прийняття рішень без людського втручання.

РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ, ЗБІР ДАНИХ ТА СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ КОМПОНЕНТІВ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Обраний об'єкт дослідження

Морозильний тунель ОЧУ розроблений і виготовлений компанією Hans Jensen Engineering, Данія. Морозильна тунельна/стійкова камера – це великомасштабна промислова морозильна камера, яка використовується для швидкого заморожування великої кількості харчових продуктів (креветки, риба, м'ясо, молочне морозиво тощо). Морозильний тунель є важливим обладнанням харчової промисловості, який працює за принципом одноразового часу утримання. Час зберігання – це час, протягом якого продукт перебуває в морозильній камері після того, як він був введений у морозильну камеру. Цей час залежить від розміру, товщини та форми виробу. Наприклад, термін зберігання великих продуктів (риби) відрізняється від дрібних (креветок).

Загальний вигляд системи заморожування тунелю ОЧУ (рис. 2.1). Як показано на рисунку, тунель складається з системи подачі, стелажної системи та системи видачі[36]. Система подачі складається з подаючого конвеєра, штовхача подачі та буферної пластини. Стелажна система складається з 216 стелажів, станції натягування ланцюга. Вивантажувальна система складається з буферної пластини, штовхача та вивантажувального конвеєра. Він також складається з електромеханічної та холодильної системи.

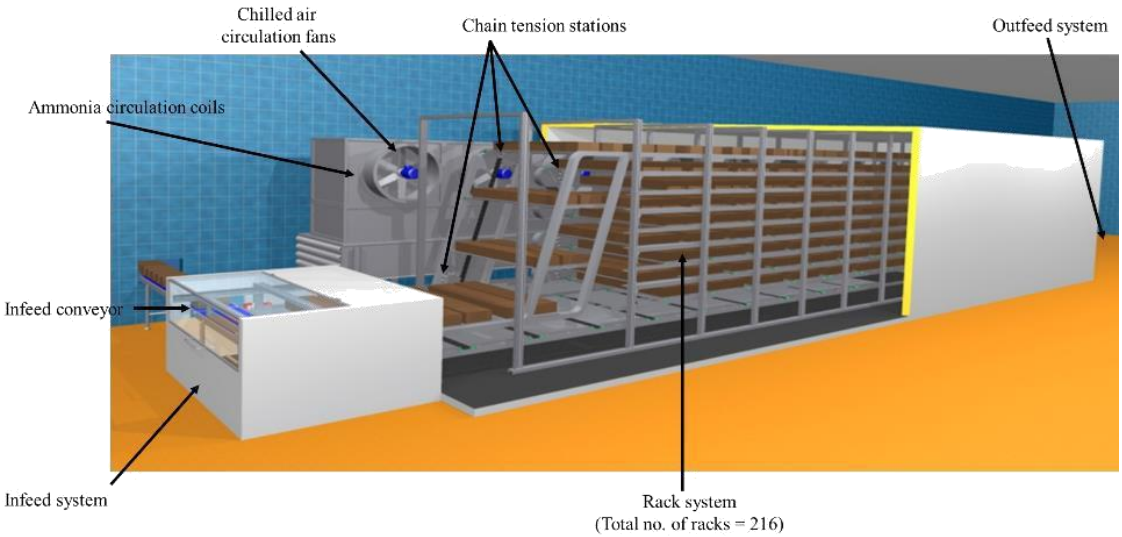


Рисунок 2.1 - Тунель заморожування ОЧУ

Тунель заморожування ОЧУ заморожує один і той самий продукт за раз, та оскільки тунель працює за принципом «Перший входить – перший виходить (FIFO)», це означає, що продукти мають однаковий час утримання. Цей тунель призначений для невеликої та великої кількості продуктів на годину та має виробничу потужність 5,1 тонни за один повний цикл[36]. Повний цикл триває 2-3 години, в залежності від розміру продукту. Великі продукти потребують більшого часу заморожування, щоб досягти основної температури. В таблиці 2.1 узагальнено основні характеристики тунелю. Вона попередньо задає розрахунок виробничої потужності для морозильного тунелю.

Таблиця 2.1: Розрахунок виробничої потужності тунелю заморожування ОЧУ

Показник	**Кількість**	**Примітки**
Вага 1 плити	1 кг	
Кількість плит на стелажі	24 шт.	(8 плит в ряд х 3 ряди на одному стелажі)
Загальна вага продукту на одному стелажі	24 кг.	
Загальна кількість стійок	216	
Всього продукту, перероблено за один цикл	5184 кг	(24 х 216)
Потужність обробки (1 партія)	5,1 тонна/цикл	один цикл становить приблизно 2-3 години
Потужність обробки морозильного тунелю	40 тонн/день	

2.2 Системний аналіз для обраної фізичної системи

2.2.1 Процеси життєвого циклу

Тунель заморожування ОЧУ має вісім процесів життєвого циклу, які наведені в таблиці 2.2. Зацікавлені сторони на етапах життєвого циклу розподіляються між постачальником і замовником. Hans Jensen Engineering є постачальником, який розробив і виготовив систему. Замовником є компанія-покупець обладнання. Вона ж відповідає за експлуатацію та обслуговування обладнання.

Таблиця 2.2: Процес життєвого циклу заморожувального тунелю

		Зацікавлена сторона	
№	**Процес життєвого циклу**	**Постачальник:**	**Замовник:**
1	Дослідження та розробка	√	-
2	Виробництво	√	-
3	Логістика та постачання	√	√
4	Монтаж і введення в експлуатацію	√	√
5	Навчання	√	√
6	Експлуатація та технічне обслуговування	-	√
7	Оновлення та модифікація	√	√
8	Утилізація та виведення з експлуатації	√	√

2.2.1.1 Ключові зацікавлені сторони

Є три основні зацікавлені сторони в тунелі заморожування ОЧУ – відділи виробництва, технічного обслуговування та якості підприємства. Виробничий відділ відповідає за використання морозильного тунелю, відділ технічного обслуговування - за щоденну роботу та обслуговування тунеля, а відділ якості відповідає за те, щоб продукт, який обробляється в морозильному тунелі ОЧУ, відповідав вимогам якості компанії.

2.2.2 Системний контекст

Морозильний тунель ОЧУ складається з трьох основних частин - системи подачі, стелажної системи та системи видачі. Він також складається з механічної, холодильної та електричної систем. Системний контекст тунелю заморожування ОЧУ (рис. 2.2)[36]:

Рисунок 2.2 - Контекст системи заморожувального тунелю

2.2.3 Збій системи

Тунель для заморожування ОЧУ складається з трьох основних систем - системи подачі, стелажної системи та системи видачі. Система подачі складається з двох подаючих конвеєрів, фотодатчика, буферної пластини, штовхача плит та захисного скла. Фотосенсор підраховує 8 плит продукту і зупиняє конвеєр. Плити з продуктами переміщуються з конвеєра на стелажі за допомогою автоматичного штовхача. Виштовхувач плит переміщує 8 плит до буферної пластини від подаючого конвеєра. Коли буферна плита і стелаж знаходяться на одному рівні, штовхач плит переміщує 8 плит продукту на стелажі. Тунельна система подачі заморозки ОЧУ (рис. 2.3):

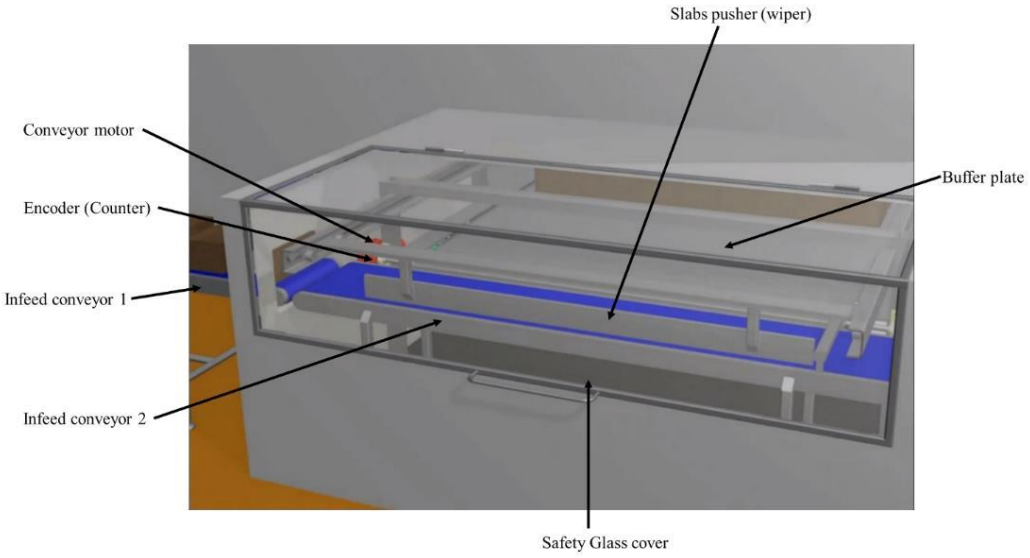


Рисунок 2.3 - Система подачі тунелю

Стелажна система складається зі стелажів, основного ланцюга та двох приводних двигунів, станцій натягу ланцюга (нижня, середня та верхня), підшипників, коліс та системи охолодження (вентилятори циркуляції охолодженого повітря, випарники та система розморожування). Стелажі приводяться в рух двома основними ланцюгами, які встановлені з кожного боку. Товщина кожного ланцюжка 3 дюйми. Стелажі з'єднані ланцюгом через шпильки. Зламані шпильки можуть призвести до поломки. Стелажі повертаються за допомогою PEHD коліс і завжди тримаються в горизонтальному напрямку. Внутрішній вигляд тунелю для заморожування ОЧУ (рис. 2.4):

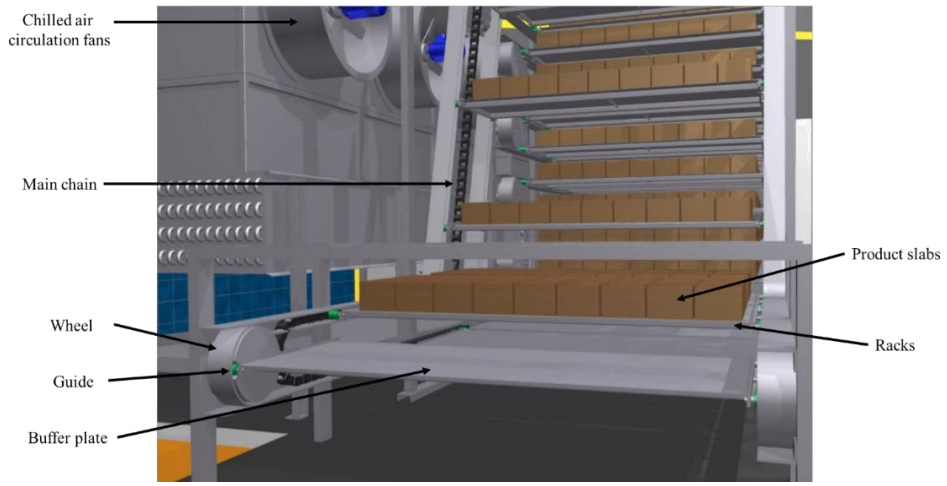


Рисунок 2.4 - Вигляд тунеля зсередини

У морозильному тунелі є 216 стелажів. Кожен вміщує три ряди картонних коробок з продуктами і в кожному рядку міститься вісім пластин/коробок продукту. Ці плити переміщуються по стелажах майже 2 – 3 години, поки не буде досягнута температура продукту -18 °C. Стелажна система морозильного тунелю ОЧУ (рис. 2.5).

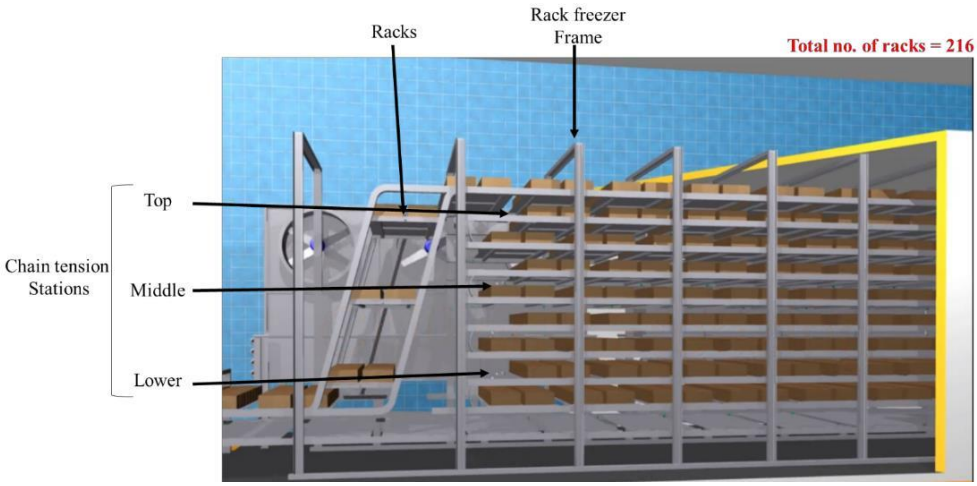


Рисунок 2.5 – стелажна система тунелю

Система видачі є дзеркальною копією системи подачі. Вона складається з випускного отвору, буферної пластини, вихідного конвеєра. На станції розвантаження плити продукту переміщуються зі стелажів на вивантажувальний конвеєр за допомогою автоматичного штовхача (підмітальної машини).

2.2.4 Система автоматизації та управління

Система автоматизації та керування тунелями заморозки ОЧУ складається з наступних пристроїв:

— Датчики, перетворювачі та прилади;

— Програмований логічний контролер;

— Людино-машинний інтерфейс.

2.2.4.1 Датчики

На морозильному тунелі ОЧУ встановлені різні типи датчиків, наприклад, положення, відстані, підрахунку, температури тощо. У таблиці 2.3 наведено тип і кількість датчиків, встановлених у морозильному тунелі SRT[37].

Таблиця 2.3 - Датчики встановлені на морозильному тунелі ОЧУ..

Датчик	**Тип**	**Задача**	**Кількість**
Індуктивні датчики наближення	Цифровий	Виявлення металу	36
Датчики наближення	Цифровий	Виявлення об'єктів	46
Фотосенсори	Цифровий	Наявність/відсутність об’єкта	12
Фотосенсори (світловідбиваючого типу)	Цифровий	Наявність/відсутність об’єкта	6
PT-100		Датчики температури	3
Кодер (лічильник)	Цифровий	Підрахунок кількості плит	4
Кодер (визначення положення)	Цифровий	Система позиціонування стелажа	3

2.2.4.2 Програмований логічний контролер

ПЛК — промислові комп’ютери, які використовуються для автоматизації виробничого процесу. Датчики передають покази технологічних змінних (температури, швидкості, положення, відстані тощо) до системи ПЛК. Ці дані є часовими рядами. У морозильному тунелі ОЧУ присутня система Siemens s7 – Micro-master 400 Programmable Logic Controller. Контекст системи ПЛК (рис. 2.6)[38].

Рисунок 2.6 - Контекст системи ПЛК

Програмований логічний контролер складається з основних компонентів мікропроцесорів, пам'яті зберігання, комунікаційного інтерфейсу, модулів таймера і лічильника, модулів входу і виходу. Входи бувають цифровими (5/12/24В) або аналоговими (4-20 мА).

2.2.4.3 Людино-машинний інтерфейс

ЛМІ «Siemens Sematic Touch» використовується для забезпечення інтерфейсу між ПЛК та оператором. Він забезпечує графічний інтерфейс користувача між параметрами процесу та системою моніторингу процесу. Оператор може легко взаємодіяти з ЛМІ, щоб давати інструкції обладнанню та бачити вихід, помилки та сигнали тривоги. Головний екран ЛМІ (рис 2.7). Можна побачити, що є варіанти вибору різних режимів роботи, функціональності датчиків, стану різних компонентів (завантажувальних конвеєрів, буферних пластин, вихідних конвеєрів)[37].

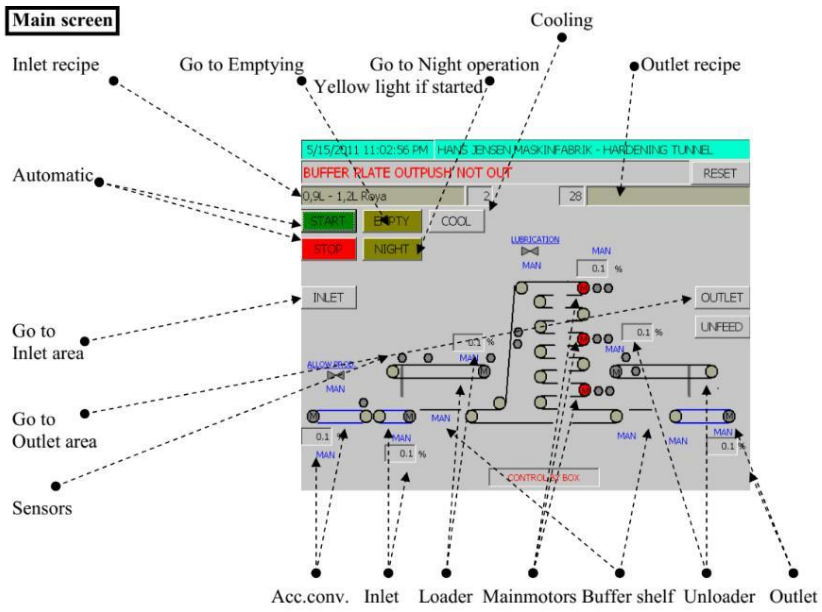


Рисунок 2.7 - Екран ЛМІ заморожувального тунелю ОЧУ

2.2.4.4 Комунікаційний інтерфейс

Profibus (Process Field Bus) використовується для зв'язку між різними польовими приладами, датчиками, контролером. Profibus - це стандартний протокол зв'язку для автоматизації процесів.

2.2.4.5 Холодильна система

Цикл охолодження аміаку (рис. 2.8)[39]. Можливості стиснення та витрати аміаку використовуються для створення дуже низької температури (-27 ^{o}C). Аміачна холодильна система складається з таких основних компонентів: компресор, конденсатор, розширювальний клапан і випарник[40]. Компресор використовується для стиснення газу аміаку, надлишкове тепло видаляється, а пари високого тиску конденсуються до рідкого аміаку, який проходить через розширювальний клапан для зниження температури рідини. Іноді через інтенсивне охолодження на змійовиках з аміаком наморожується крига. Для її видалення зі змійовика встановлюється автоматизована система розморожування.

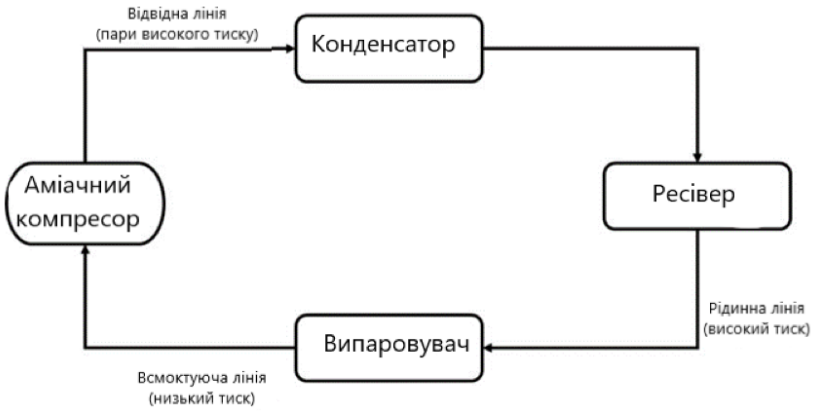


Рисунок 2.8 - Цикл охолодження аміаку

2.2.4.6 Система системи

Система системного контексту тунелю заморожування ОЧУ (рис. 2.9)[37]. Вся система розділена на чотири основні категорії: рівень підприємства, рівень системи, рівень підсистеми та рівень компонентів. Можна побачити, що на рівні підприємства обрана критична система є частиною переробного заводу. На системному рівні вона є частиною системи заморожування. На рівні підкомпонентів вона має системи подачі, стелажну систему та систему подачі. На рівні компонентів - несучі двигуни (конвеєри), датчики є основною частиною системи. За допомогою системного підходу система морозильного тунелю ОЧУ була розбита на основні компоненти.

Рисунок 2.9 – рівні системи ОЧУ

2.2.4.7 Системні операції

Морозильний тунель має два основних режими роботи, автоматичний режим і ручний режим. Автоматичний режим роботи також можна розділити на три підкатегорії; повністю автоматичний режим, нічний режим і режим спорожнення. У ручному режимі роботи доступні дві функції; режим старт-стоп і режим пробіжки. Режими роботи (рис. 2.10)[37]. Важливо зазначити, що одночасно можна обрати лише один режим.

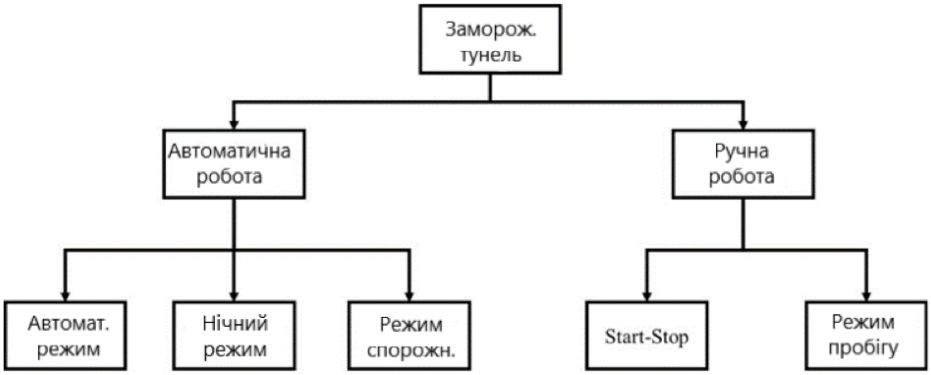


Рисунок 2.10 – Режими роботи морозильного тонелю

2.2.4.7.1 Сценарій операційного використання

а) Автоматичний режим - сценарій використання

Послідовна діаграма варіантів використання автоматичного режиму тунелю заморожування ОЧУ (рис. 2.11)[37]. Автоматичний режим – це взаємодія між оператором, екраном ЛМІ та тунелем заморожування. Після вибору бажаних параметрів рецепта та тривалості циклу оператор може запустити автоматичний режим на екрані ЛМІ. Усі датчики положення переміщуються в нульове положення і запускаються оператори холодильного обладнання. Для досягнення потрібної температури потрібно майже півгодини. Незабаром після того, як система відповідає температурним вимогам, можна розпочати подачу продукту.

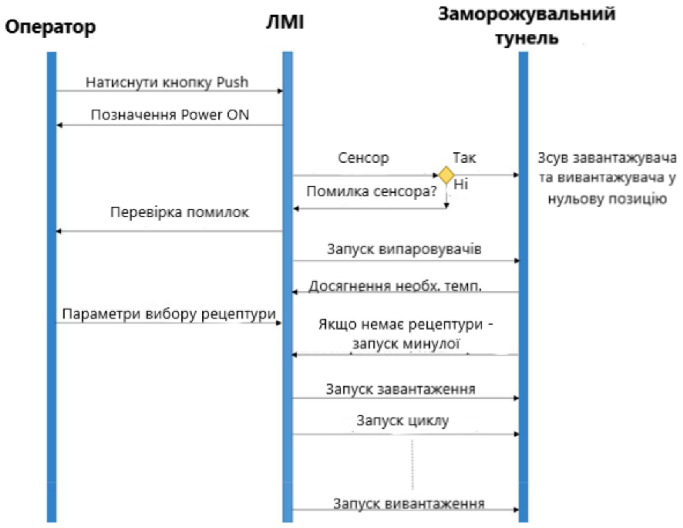


Рисунок 2.11 – автоматичний режим роботи тонелю

У нічному режимі немає подачі або виведення, цикл системи стелажа просто продовжує працювати. Це використовується, коли немає доступної проміжної виробничої зміни. Але необхідно продовжувати ланцюг виробництва, так як при такій низькій температурі ланцюг k застряє і стає важко працювати. У режимі спорожнення немає подачі матеріалу, цикл продовжується, а подача/вивантаження матеріалу працює, щоб видалити матеріал з морозильної камери.

б) Ручні операції - сценарій використання

Схема сценарію використання ручного режиму (рис. 2.12)[37]. Ручний режим зазвичай використовується для перевірки роботи різного обладнання. Він також використовується для виведення стелажу в нульове положення, якщо сталася поломка в автоматичному режимі.

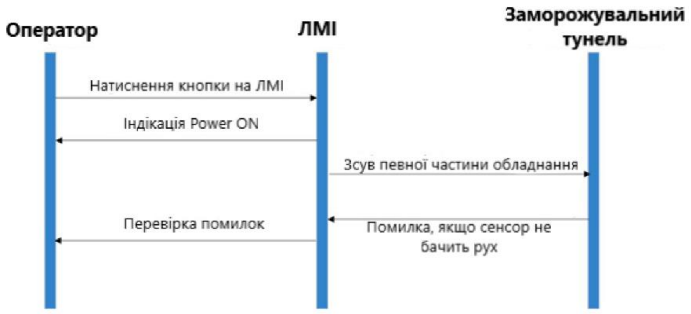


Рисунок 2.12 – ручний режим роботи тунелю

2.2.4.8 Сценарії обслуговування

У морозильному тунелі ОЧУ є кілька стратегій ТО, починаючи від щоденних експлуатаційних перевірок до щорічного технічного обслуговування[37]. Згідно з інформацією, наведеною у технічній документації у таблиці 2.4 наведено стратегії технічного обслуговування із зазначенням їх частоти та відповідальних осіб.

Таблиця 2.4 - Стратегія обслуговування заморожувального тунелю ОЧУ

Стратегія обслуговування	**Частота технічного обслуговування**	**Відповідальний**
Корекційне обслуговування	Технічне обслуговування поломок	- Технік з технічного обслуговування - Інспектор технічного обслуговування
Профілактичне обслуговування	- Перевірки технічного обслуговування та інспекції - Щотижня - Щомісячно - Щоквартально - Раз на пів року - Річні	- Технік з технічного обслуговування - Інспектор технічного обслуговування
Технічне обслуговування першої лінії	- Щоденні операції - Вирішення проблем - Сигнали про збій/помилку - Зміна рецептури продукту	Оператор технічного обслуговування

Технічне обслуговування за умовами	- Аналіз вібрації головного двигуна - Термографія для електричних та контрольних панелей	Третя сторона - Служба технічного обслуговування сторонніх організацій

2.2.4.8.1 Сценарій виконання технічного обслуговування

а) Корекційне обслуговування – сценарій використання

Схема послідовності використання коригувального технічного обслуговування (рис. 2.13)[37]. Коли оператор або виробничий персонал повідомляє про несправність, в залежності від характеру несправності, для виявлення та усунення несправностей проводиться коригувальне обслуговування.

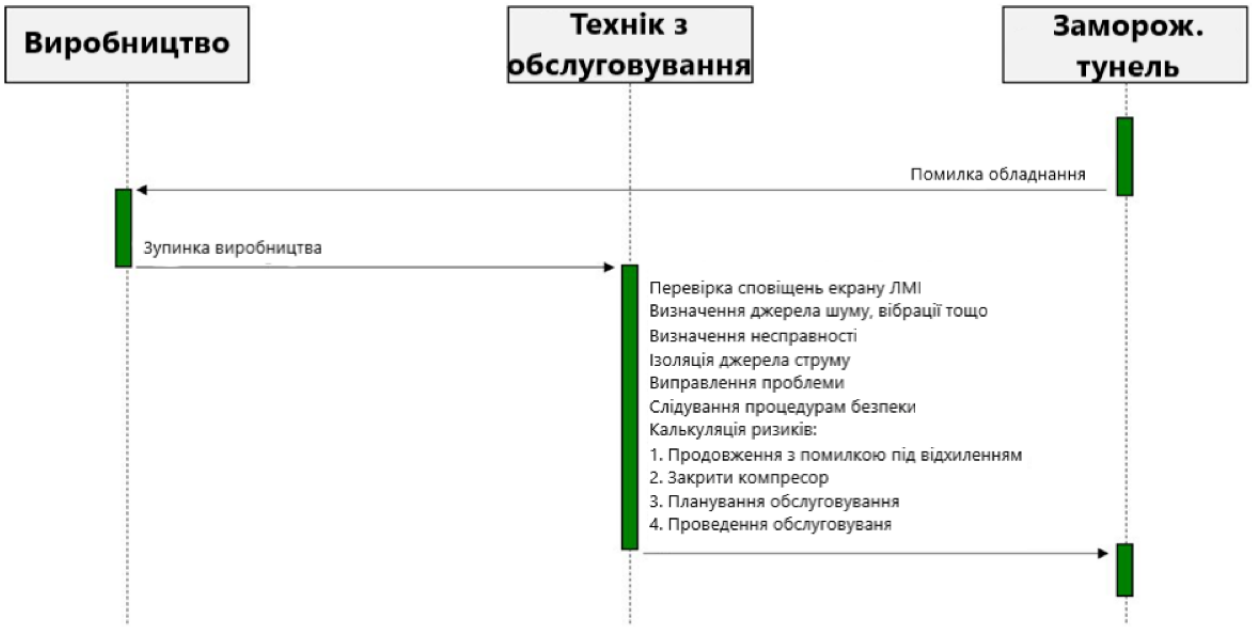


Рисунок 2.13 - Сценарій виконання корекційного обслуговування

б) Профілактичне обслуговування – сценарій використання

Схема послідовності використання варіантів профілактичного обслуговування (рис. 2.14)[37]. Випадок використання профілактичного технічного обслуговування взаємопов’язаний між програмним забезпеченням

КСУТО, планувальником технічного обслуговування, техніком, тунелем заморожування та виробничим графіком. Планувальник технічного обслуговування формує робочий наряд ТО, перевіряє наявність обладнання та розпоряджає необхідні запасні частини та інструменти для виконання робіт з технічного обслуговування. Роботи з технічного обслуговування виконується техніком і перевіряються виробничим персоналом на належну роботу обладнання.

Рисунок 2.14 - Сценарій застосування профілактичного обслуговування

в) Обслуговування першої лінії – сценарій використання

ТО першої лінії включає щоденні перевірки, моніторинг, усунення несправностей та дрібний ремонт, пов’язаний із роботою обладнання. Більшістю операцій з обслуговування першої лінії можна керувати за допомогою ЛМІ. Зміна рецептури виробництва також є обов’язком оператора першої лінії обслуговування. Схема послідовності використання варіантів обслуговування першої лінії (рис. 2.15)[37]. Можна побачити, що діяльність з ТО першої лінії взаємопов’язана між виробництвом, оператором і морозильним тунелем. Виробничий план і графік оформлюються керівником виробництва. Оператор повинен переконатися, що морозильний тунель працює в автоматичному режимі з корінною температурою перед початком виробництва.

Рисунок 2.15 - Сценарій використання технічного обслуговування першої лінії

г) Технічне обслуговування на основі стану – сценарій використання

Технічне обслуговування на основі стану здійснюється стороннім постачальником послуг. Періодичність перевірок моніторингу стану зазвичай проводиться раз на півроку або за запитом керівника технічного обслуговування.

2.2.4.9 Відмови, режими і механізми

Аналіз дерева відмов тунелю заморожування ОЧУ (рис. 2.16)[37]. Можна побачити, що зупинка ланцюга, стеллажу та тунелю є основними помилками тунелю заморожування ОЧУ.

Рисунок 2.16 – дерево відмов заморожувального тунелю

FMECA (Failure mode effects and criticality analysis): Ефекти режиму відмови та аналіз критичності. Мета цього аналізу полягає в тому, щоб усунути (або принаймні мінімізувати) ймовірність того, що система матиме серйозні

поломки. Знаючи потенційні недоліки та їх потенційний вплив на всю систему, легше вирішити, які частини можна відрегулювати, щоб зробити її більш надійною. Для подальшого внесення у систему був проведений аналіз FMECA для тунелю заморожування ОЧУ. Проведення аналізу було розбите на декілька кроків.

Першим кроком стало виділення потенційних режимів відмов тунелю заморожування ОЧУ на основі функції його фізичних компонентів розглянутих у п. 2.1, 2.2. Основними відмовами є: зупинка стелажів, зупинка заморожувача, поломки валів, зубців, коліщаток та роликів. Після цього були виділені компоненти, в яких можуть трапитись ці відмови, а саме: головний двигун, коробка передач, ланцюги, підшипники та стелажі. Далі кожному типу відмови було призначено рейтинг поширеності, серйозності та ймовірності виявлення за трьохбальною системою, де 1 – найменший вплив, а 3 – найбільший. Згідно призначених балів для кожної розраховується НПР – номер пріоритету ризику (RPN – Risk Priority Number), який розраховується за наступною формулою(2.1):

НПР = Поширеність * Серйозність * Ймовірність виявлення. (2.1)

В результаті отримання значення НПР для кожного виду відмови стає можливим визначити найбільш критичні вузли в системи та класифікувати їх. Чим менший показник НПР, тим кращим вважається показник. Дані проведеного аналізу FMECA для заморожувального тунелю ОЧУ згідно основних фізичних компонентів, їх функції та потенційних причин відмов узагальнено у таблиці Б.1 **Додатку Б**. Ці дані можуть бути завантажені у систему КСУТО для створення «підгрунтя» для аналізу та планування обслуговування на основі показника НПР.

Висновки до розділу 2

У другому розділі був проведений детальний системний аналіз об’єкту дослідження – морозильного тунелю ОЧУ. Були наведені основні його системи та проведений розрахунок виробничої потужності тунелю, а також проаналізовані усі процеси життєвого циклу обладнання, наведені зацікавлені

сторони(відділи) підприємства. Після цього були проаналізовані контекст системи обладнання та можливі збої у його роботі, а також систему автоматизації та управління тунелю, разом із встановленими на ньому датчиками, ПЛК, ЛМІ та можливими системними операціями зі сценаріями операційного використання обладнання. Далі були проаналізовані сценарії обслуговування обладнання та структуровані у вигляді таблиці стратегії його обслуговування. В результаті було проведено аналіз дерева відмов обладнання та аналіз відмов FMECA, які дозволили виділити та структурувати у вигляді таблиці основні критичні компоненти обладнання, такі як: головний двигун, підшипник, стелажі, ланцюги та коліщатка. Для цих компонентів були виділені потенційні відмови разом з їх причинами та розрахований показник номеру пріоритету ризику(НПР). Отримані можуть бути завантажені у систему КСУТО для створення «підгрунтя» для аналізу та планування обслуговування на основі показника НПР, а також класифікувати найбільш критичні вузли системи.

РОЗДІЛ 3. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ДЛЯ ПРОГРАМИ ПТО ТА СИСТЕМИ КСУТО

3.1 Програма прогнозування здоров'я та продуктивності

У цьому розділі концепції ПТО були застосовані до тунелю заморожування ОЧУ для виявлення несправностей і аномалій у компонентах машини. На першому етапі морозильний тунель ОЧУ був розділений на основні секції: система подачі, стелажна система та система видачі. Були виділені критичні компоненти, пов’язані з кожною секцією (жовтим кольором), двигун, коробка передач, підшипник, вал, підшипник насоса (рис. 3.1)[37]. Ці критичні компоненти були визначені щодо їх критичної функціональності в системі.

Рисунок 3.1 - Розподіл та ідентифікація критичних компонентів морозильного тунелю ОЧУ

Після цього були обрані вимірювальні IoT-датчики, а саме: трьохвісний акселерометр, перетворювач струму, магнітні датчики масляного сміття, п’єзоелектричні датчики для вимірювання стану критичних компонентів у реальному часі (двигун, підшипник, вал, насос). Ці датчики є найважливішою частиною системи, оскільки вони генерують дані про поточний стан компонентів і передають їх на сервер даних/хмарне сховище. Ці дані передаються мережею рівня з’єднання/передавання з архітектурою на основі IoT. Датчики перетворюють фізичні дії з фізичних компонентів на цифрові сигнали, які передають такі змінні, як: вібрація, температура, акустичні емісії тощо[41].

У таблиці 3.1 представлені критичні компоненти тунелю заморожування ОЧУ, їх потенційні частини відмов, техніка моніторингу стану із застосуванням відповідних обраних датчиків, а також алгоритм обробки цих даних.

Таблиця 3.1 - критичні компоненти тунелю заморожування ОЧУ

Компонент	**Потенційний збій**	**Техніка вимірювання**	**Вимірювальний датчик**	**Алгоритм**
Підшипник	Зовнішнє кочення, внутрішнє кочення, ролик, клітка	Вібрація, масляне сміття, акустичні емісії	Тривісний акселерометр, магнітні датчики масляного сміття, п'єзоелектричний датчик	Багатошарова персептронна нейронна мережа
Коробка передач	Відсутній зуб, тріщина, знос	Вібрація, температура, масляне сміття, акустичні емісії	Акселерометр, датчик температури, магнітні датчики масляного сміття, п'єзоелектричний датчик	Багатошарова персептронна нейронна мережа
Вал	Несоосність, дисбаланс, механічна нещільність	Вібрація	Акселерометр	Багатошарова персептронна нейронна мережа
Помпа	Проблема з поршнем, підшипником, кривошипом	Вібрація, тиск, акустичні емісії	Акселерометр, п'єзоелектричний датчик	Багатошарова персептронна нейронна мережа
Генератор	Несправність ротора/статора, електрична несправність	Струм і напруга статора, вібрація	Датчик струму, акселерометр	Багатошарова персептронна нейронна мережа

Для прикладу застосування прогнозування здоров’я був обраний електродвигун з коробкою передач із частотою обертання 1440 об/хв, на зовнішній поверхні корпусу підшипника якого був встановлений тривісний акселерометр для проведення вібраційного аналізу. Цей аналіз використовується для діагностики несправностей передач у коробці. Отримані вібраційні сигнали зазвичай забруднені шумом і можуть призвести до неправильної інтерпретації результатів, а зниження рівня шумів вилучених вібраційних сигналів допомагає діагностувати несправність, даючи значущі результати. Дослідження проводилось для справної передачі та передачі зі зламаним зубцем.

Перетворення вейвлета збільшує співвідношення сигнал/шум, зменшує середньоквадратичну похибку і є ефективним для знешумлення сигналів вібрації передачі. Вилучені сигнали мають бути знешумлені за допомогою вибору належної схеми зняття шумів, щоб запобігти втраті інформації про сигнал разом із шумом. Три вибрані вейвлет-схеми знешумлення, а саме Аналіз основних компонентів, емпірична модова декомпозиція, коефіцієнт Нейкоеффа, було порівняно з адаптивним порогом - широко використовуваною схемою знешумлення на основі вейвлетів для сигналу вібрації передачі. Функції, витягнуті з заглушених сигналів, були використані для навчання та тестування моделей штучної нейронної мережі.

3.1.1 Аналіз основних компонентів

АОК зменшує дані великого розміру до даних з низькими розмірами, зберігаючи при цьому найважливішу інформацію[42]. АОК дає «n» нових основних компонентів, які можна вибірково трансформувати та повертати за допомогою вибору компонентів, фільтруючих шумні компоненти. Шум у сигналі можна зменшити, придушивши менші вейвлет-коефіцієнти, які зазвичай мають менші енергії, і враховуючи великі вейвлет-коефіцієнти з високими енергіями[43]. АОК має здатність зберігати кілька найважливіших основних компонентів. Алгоритм виглядає наступним чином[44]:

1. Обчислення середнього значення вектора сигналу μ (3.1):

$$\mu = \frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p} x_k \tag{3.1}$$

2. Знаходження матриці коваріантності C (3.2)

$$\mathrm{C} = \frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p}\{x_k - \mu\}\{x_k - \mu\}^T \tag{3.2}$$

3. Обчислення власних значень λi та власних векторів νi коваріаційної матриці C (3.3)

$$(\mathrm{C} - \lambda_i I)\nu_i = 0, \tag{3.3}$$

де $i = 1,2,3$

4. Оцінка власних векторів високого значення та розташування власних значень λi в порядку спадання. Співставлення вихідного сигналу з власними значеннями. (3.4)

$$u = x * \lambda_i \tag{3.4}$$

3.1.2 Емпірична модова декомпозиція

Метод емпіричної модової декомпозиції розкладає сигнал на скінченну кількість підкомпонентів, відомих як функції внутрішнього режиму. Ці ФВР є представленням коливального режиму певного сигналу, отриманого шляхом систематичної обробки, відомої як відсіювання. Воно повинно задовольняти наступним двом властивостям: a) «1» має бути найвищою різницею між екстремумами та кількістю нульових перетинів. b) У будь-якій даній точці середнє огинаюче(envelope mean), створене за допомогою мінімумів і максимумів, має дорівнювати нулю[45]. Для заданого сигналу x(t) алгоритм виконання просіювання виглядає наступним чином:

Для початку необхідно ідентифікувати всі максимуми і мінімуми для сигналу x(t). Мінімуми, що закінчуються сигналом xmin(t), а також між

максимумами, щоб отримати xmax(t), необхідно інерполювати. Далі слід обчислити середнє значення між цими двома envelope(3.5):

$$x_{avg}(t) = \left(x_{max}(t) + x_{min}(t)\right) \tag{3.5}$$

Частина d1(t) має бути вилучена, та введена як вхідні дані для наступної ітерації просіювання:(3.6):

$$d_1(t) = x(t) - x_{avg}(t) \tag{3.6}$$

Критерій припинення кількості ітерацій просіювання використовується для того, щоб переконатися, що компоненти ФВР зберігають необхідне фізичне відчуття як амплітудної, так і частотної модуляції. Це досягається шляхом обмеження стандартного відхилення(SD) між двома послідовними результатами ітерації просіювання. Якщо виконується k ітерацій просіювання, SD представляється наступним рівнянням(3.7):

$$SD = \sum_{t=0}^{L-1} [\frac{|d_{k-1}(t) - d_k(t)|^2}{d_{k-1}^2(t)}]^2 \tag{3.7}$$

Після того, як dk(t) приймається як перший ФВР, залишок h1(t), обчислюється як: (3.8, 3.9)

$$r_1(t) = x(t) - d_k(t) \tag{3.8}$$

$$h_1(t) = d_k(t) \tag{3.9}$$

Для витягування другого ФВР, r1(t) вводиться як вхідні дані для процесу просіювання в наступному раунді. Процес ЕМД можна зупинити, коли залишок rn(t) досягне монотонної функції, оскільки більше ФВР не можна витягнути. Оскільки сигнал X(t) проходить N раундів процесу просіювання, буде розкладено N наборів ФВР, сигнал залишку задається як: (3.10)

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N} h_k(t) + r_n(t) \tag{3.10}$$

(3.10) показує, що сигнал, розкладений за допомогою процесу ЕМД, може бути відновлений за допомогою компонентів ФВР hk(t) і сигналу залишку rn(t).

3.1.3 Коефіцієнт Нейкоефа

Під час звичайного знешумлення порогове значення виконується без урахування впливу сусідніх коефіцієнтів. Але в КН, розмір сусіднього коефіцієнта повинен бути обраний до порогового значення[46]. Цей метод вимагає попереднього фільтра перед декомпозицією вейвлета і постфільтра після вейвлет-реконструкції. Сигнал, що цікавить, можна подати у вигляді: (3.11)

$$D_{j,k} = D^*_{j,k} + E_{j,k} \tag{3.11}$$

Ej,k має багатовимірний нормальний розподіл N(0, Vj). Матриця Vj є коваріаційною матрицею для члена помилки рівня j. За допомогою стандартного перетворення (3.12)

$$\theta_{j,k} = D^T_{j,k} V_j^{-1} D_{j,k} \tag{3.12}$$

Матриця Vj визначається так:

Визначення mad(y) як 1,4826 median (abs(y- median(y))) (3.13, 3.14)

$$\begin{cases} a_1 = {}^1\!/_{mad(row_1)} \\ a_2 = {}^1\!/_{mad(row_2)} \\ b_1 = mad(a_1 row_1 + a_2 row_2) \\ b2 = mad(a_1 row_1 - a_2 row_2) \end{cases} \tag{3.13}$$

$$V_j = \begin{pmatrix} {}^1\!/_{a_1 a_1} & {}^{b_1 - b_2}\!/_{(b_1 + b_2) a_1 a_2} \\ {}^{b_1 - b_2}\!/_{(b_1 + b_2) a_1 a_2} & {}^1\!/_{a_2 a_2} \end{pmatrix} \tag{3.14}$$

Два рядки 1, 2 представляють рядки коефіцієнтів з кількома хвилями. У 3.15 вибір N0 здійснюється відповідно до тривалості сигналу функції та підтримки вейвлетів. Тут S^2j,k — локальна енергія, а розмір сусіда — (2N+1), який змінюється залежно від рівня. Результати декомпозиції та зменшення вибірки зменшили залежність коефіцієнтів із збільшенням рівня.

$$S_{j,k}^2 = \sum_{n=-N}^{N} \theta_{j,k+n,}^2 \quad N = N_0 - j \tag{3.15}$$

Отже, враховуючи всі параметри та рівняння вище порогової формули можна подати як: (3.16)

$$D_{j,k} = \begin{cases} D_{j,k}\left(1 - \dfrac{a\mu^2}{S_{j,k}^2}\right) \text{якщо } S_{j,k}^2 \geq a\mu^2 \\ 0 \qquad \text{інакше} \end{cases} \tag{3.16}$$

де μ задається як 2logn, а α — параметр, який використовується для налаштування порогового значення, зазвичай значення α приймається як α= (2N+1)⁄3.

3.1.4 Адаптивний поріг

У вейвлет-декомпозиціях зазвичай припускаєтсья, що енергія поломки зосереджена серед кількох вейвлет-коефіцієнтів. Але це не так, оскільки енергія шуму займає майже всі вейвлет-коефіцієнти. Встановлення низького порогового значення призводить до збереження всього сигналу разом із шумовими коефіцієнтами. Якщо встановлено високе порогове значення, багато корисних коефіцієнтів деталізації можуть бути вилучені, тому потрібно розрахувати та адаптувати правильне порогове значення, щоб зберегти сигнал і видалити лише вміст шуму[47].

3.1.5 Використання вейвлет-схем знешумлення

Необроблені сигнали вібрації, отримані від спеціально налаштованої випробувальної установки, були проаналізовані за допомогою програми MATLAB. Використовується дискретне вейвлет-перетворення і вейвлет Добеші.

У **Додатку В** показані графіки швидкого перетворення Фур’є для справної із передаточним числом 0.9 у навантаженому стані, знешумлені чотирма розглянутими вище схемами (рис. В.1). Графіки для несправної передачі з типи ж умовами (рис. В.2).

Графіків, наведених у **Додатку В** можна побачити, що амплітуда для несправної передачі збільшується для схем знешумлених за АОК та АП при частоті 710 Hz і характеризує її несправність. Ідентифікація несправності є важкою у випадку ЕМД і КН, оскільки амплітуда від справної та несправної передачі на частоті 710 Hz не сильно відрізняється. Отже, схеми захисту від шумів АОК та АП є більш корисними для виявлення несправностей передач.

Співвідношення сигнал/шум – це відношення потужності сигналу до потужності шуму. Це співвідношення порівнює потрібний сигнал з рівнем фонового шуму. Його використовують для порівняння схем шумозаглушення[48]. Збільшення співвідношення сигнал/шум збільшує продуктивність видалення шумів і визначається як (3.17):

$$SNR = 10\log\frac{\sum_{i=1}^{N} x_i^2}{\sum_{i}^{N}(d_i - x_i)^2} \tag{3.17}$$

де x являє собою необроблений сигнал, а d являє собою знешумлений сигнал, а N представляє довжину сигналу. Форма розподілу амплітуди описує піки та рівність даних і може використовуватись як дескриптор даних. Вібраційний сигнал, що містить більш значущий різкий пік, має більш чітку функцію розподілу. Зазвичай пошкоджена коробка передач видає такі типи сигналів. Отже, величина коефіцієнту ексцесу для пошкодженої коробки передач буде вищою за справну, а математичне рівняння визначається як: (3.18)[49]

$$K = \frac{P\sum_{i=1}^{p}(x_i - \dot{x})^4}{(\sum_{i=1}^{P}(x_i - \dot{x})^2)^2} \tag{3.18}$$

де K - ексцес, P - кількість точок в історії сигналу x, xi - і-та точка в історії сигналу x. Таким чином, ексцес для сигналу можна отримати за четвертим централізованим моментом, нормалізованим за квадратом дисперсії. Поряд із співвідношенням сигнал/шум, середньоквадратична похибка також використовується як важливий інструмент для порівняння схем знешумлення[48]. Середньоквадратична похибка – це вибіркове стандартне

відхилення, яке враховує відмінності між прогнозованими та спостережуваними значеннями. Коли значення похибки зменшується, продуктивність зняття шумів збільшується, що показано рівнянням: (3.19)[48]

$$RMSE = (\frac{\sum_i^N (d_i - x_i)^2}{N})^{\frac{1}{2}} \quad (3.19)$$

де x - необроблений сигнал,

d - знешумлений сигнал,

N - довжина сигналу.

Значення Співвідношення сигнал/шум, ексцесу і середньоквадратичної похибки для чотирьох схем зняття шумів і для справної та несправної передачі наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Значення співвідношення сигнал/шум, ексцесу і середньоквадратичної похибки для чотирьох схем знешумлення.

Схема знешумлення	Сигнал/шум		Ексцес		СКВ похибка	
	Справна	Несправна	Справна	Несправна	Справна	Несправна
АОК	75,2255	86,7492	7,9891	110,9242	0,0007	0,0059
ЕМД	4,0023	1,1293	6,2879	84,0883	0,0250	0,3739
КН	8,9233	12,6174	6,9123	93,1260	0,0198	0,2415
АП	74,2168	83,8016	7,9710	110,5836	0,0008	0,0062

3.1.5 Порівняння різних схем знешумлення на основі штучних нейронних мереж

ШНМ - це паралельні розподілені системи обробки, побудовані з простими блоками обробки, які називаються нейронами, на основі концепції процесу навчання мозку людини[50].

Багатошарова персептронна нейронна мережа складається з вхідного шару вихідних вузлів, одного або кількох прихованих шарів обчислювальних вузлів і вихідного шару. Загальна структура БПНМ(рис. 3.4).

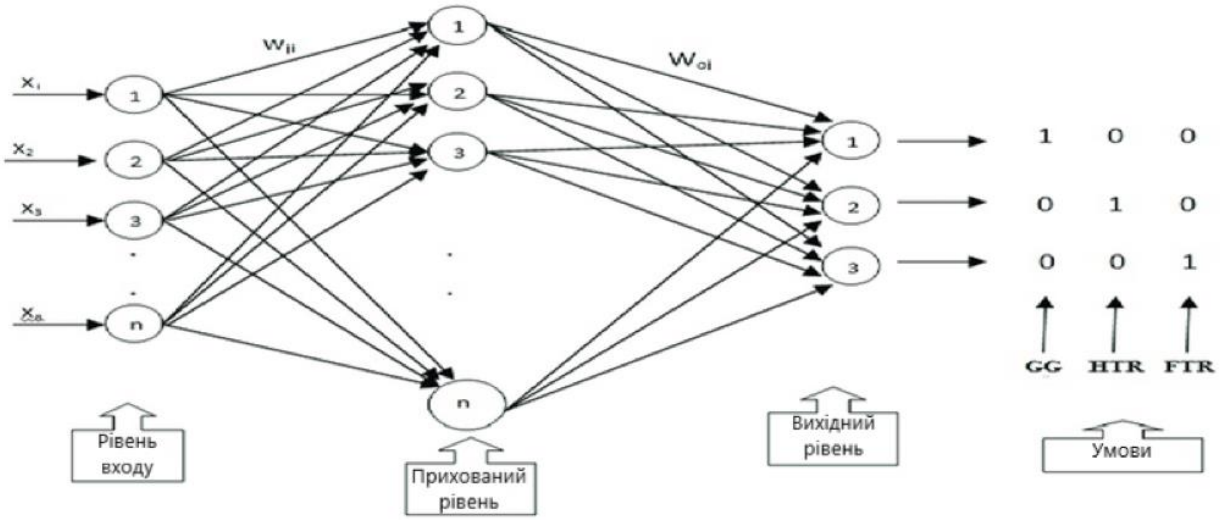


Рисунок 3.4 – структура БПНМ

Кожен шар має більше одного вузла. Вузол в кожному шарі з'єднаний з усіма вузлами сусідніх шарів. Зв’язки складаються з окремих ваг, які називаються синаптичними вагами, які помножуються на значення вузлів попереднього рівня. Розміри вхідних та вихідних даних ШНМ визначають кількість вузлів у вхідному та вихідному рівнях. Кількість прихованих шарів та їх вузлів можна знайти евристично або за правилом геометричної піраміди, заданим за допомогою рівняння: (3.20)

$$h = \sqrt{mn} \tag{3.20}$$

де h, m і n – кількість вузлів у прихованому шарі, вхідному та вихідному шарі відповідно.

Потужність класифікації БПНМ залежить від кількості прихованих шарів, а також вузлів. Оптимальна кількість прихованих шарів, а також вузлів працює нормально, а більше за оптимальну, призводить до перепідгонки класифікатора і істотно збільшує час та ресурси обчислень[50].

Отримані знешумлені сигнали розкладаються на три рівні за допомогою дискретного перетворення вейвлета. Вісім статистичних ознак, а саме стандартне відхилення, середньоквадратичне значення, ексцес, асигнування, коефіцієнт вершини, середнє значення, коефіцієнт форми та пік, виділяються з

коефіцієнтів деталізації з усіх трьох рівнів, а також із наближених коефіцієнтів на третьому рівні. 32 ознаки, отримані з кожного контейнера, утворюють єдиний шаблон. Застосування БПНМ до коробки передач не виконується у цій роботі.

3.2 Загальна архітектура розумної системи предикативного обслуговування

Функціональна архітектура розумної системи предикативного обслуговування (рис 3.5)[51]: на першому кроці дані в реальному часі отримуються від двох джерел - датчиків і системи ПЛК. На другому кроці ці дані зберігаються на сервері даних або платформі хмарного сховища. На третьому кроці небажані сигнали видаляються, а необхідні функції витягуються з сигналу. На четвертому кроці для діагностики несправностей використовується алгоритм машинного навчання. На п'ятому етапі проводиться оптимізація частоти вимірювань і умовно-тимчасового інтервалу для робіт з технічного обслуговування. На останньому кроці найбільш оптимальне рішення щодо технічного обслуговування перетворюється на дії з технічного обслуговування.

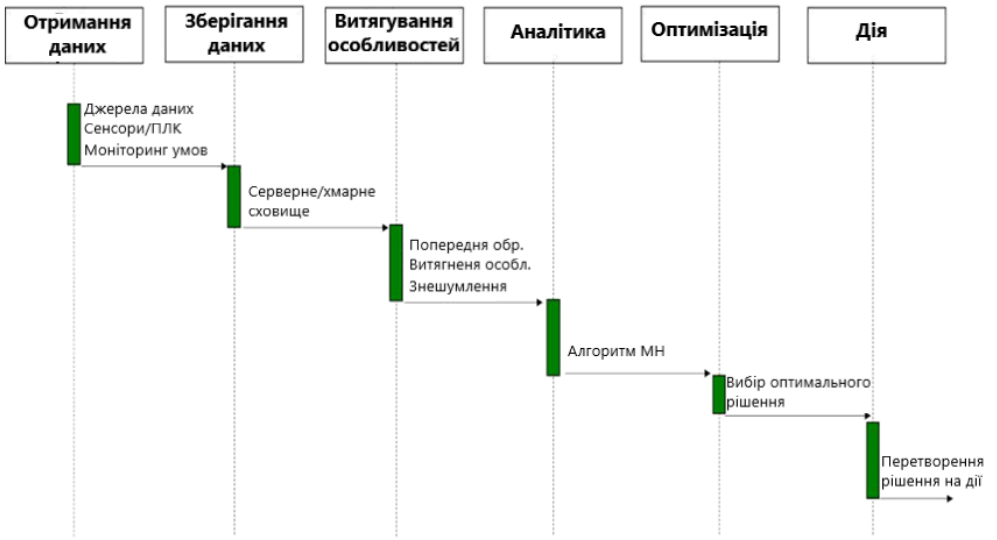


Рисунок 3.5 - функціональна архітектура розумного предикативного обслуговування

Фізична архітектура розумного предикативного технічного обслуговування, яка включає сенсори та перетворювачі, службу зберігання

даних або хмару, програмне забезпечення для передикативної аналітики та комп’ютеризовану систему управління технічним обслуговуванням (рис. 3.6).

Рисунок 3.6 - фізична архітектура розумного предикативного обслуговування

Вхідні дані, вихідні дані, ресурси та функції керування для розумного предикативного обслуговування (рис 3.7): джерелами входу є датчики, дані ПЛК, історичні дані з сервера даних/хмари[51]. Ці входи перетворюються на виходи, такі як; діагностика несправностей, прогнозування, оптимізація технічного обслуговування та автоматизована система підтримки прийняття рішень. Ресурсами для розумного предикативного обслуговування є: інструмент обробки даних, алгоритми машинного навчання, обчислювальне та аналітичне програмне забезпечення. Контрольні параметри — це визначені системою специфікації, стандарти, обмеження, контроль, правила та ключові показники ефективності.

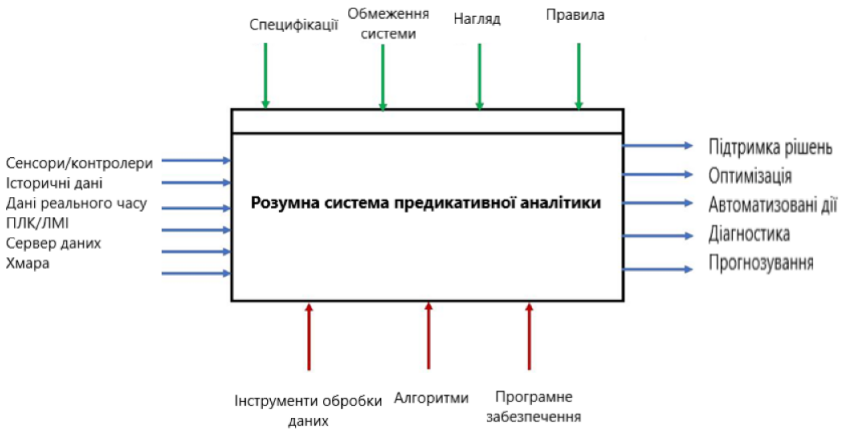


Рисунок 3.7 - Входи та вихідні функції розумного предикативного обслуговування

3.3 Системний аналіз комп'ютеризованої системи управління технічним обслуговуванням

3.3.1 Контекст системи КСУТО

Комп'ютеризована система управління технічним обслуговуванням - це модульне програмне забезпечення, яке складається з різних модулів, таких як: реєстр активів, робочий наряд, планування профілактичних робіт, управління запасами, планування бюджетів та звіти про технічне обслуговування. Основні модулі програмного забезпечення КСУТО (рис. 3.8)[29]. Деталі кожного модуля описані нижче.

Рисунок 3.8 - Модулі системи КСУТО.

3.3.2 Реєстр активів

Ієрархія активів обладнання або основний список обладнання складається з усього обладнання на заводі. Входи, вихід, ресурси та функції керування для модуля реєстру активів (рис 3.9)[29]. Вхідні параметри включають: тип обладнання, ідентифікаційні дані, номер моделі, встановлення, гарантію та рейтинг критичності тощо. Ці вхідні дані перетворюються на такі вихідні дані, як: надійність обладнання, доступність, оцінка терміну служби, замовлення на роботу та вартість ремонту. Ресурси механізмів, доступних для планування ПТО, - це OEM-керівництво з ТО, програмне забезпечення КСУТО, історія несправностей обладнання та зворотний зв'язок оператора для потреб технічного обслуговування обладнання. Контроль включає перевірку, управлінський нагляд та якість.

У реєстрі активів кожне обладнання представлено номером товару (4000578601) і серійним номером (NP-FA-FRF-001). Що є унікальним для кожного обладнання. Обладнання подібного типу слід згрупувати за одним номером підчастини.

Рисунок 3.9 - КСУТО - Функції входу та виходу для реєстру активів.

Обладнання реєструється в реєстрі активів систематичним методом або за характером обладнання, або за вимогами до ТО. Добре структурована система

кодування для реєстру активів — це конфігурація «parent-child» активу (вузла), у яких підактиви згруповані за основним активом. У таблиці 3.3 наведено приклад ідентифікаційного коду тунелю заморожування ОЧУ у програмному забезпеченні КСУТО. Ідентифікаційний код обладнання складається з номера товару та серійного номера.

Таблиця 3.3 - приклад коду реєстрації активів для тунелю заморожування

Номер деталі	**Серійний номер**
400 05 786 01	NP-FA-FRF-001
400 = Номер підприємства 05 = Електро-механічна система 786 = Заморожувальний тунель 01 = Серійний номер обладнання	NP= Нове підприємство FA = Зона заморожування FRF = Стелажний замор. 001 = Серійний номер

3.3.3 Наряд на роботу

Система нарядів на виконання робіт є серцем будь-якої системи контролю технічного обслуговування і є необхідним інструментом для ефективного планування та планування[52]. Кожне завдання технічного обслуговування представлено унікальним номером наряду на виконання робіт.

Робочий процес починається із запиту на ТО від оператора або виробничого персоналу (рис 3.10). Запит на роботу можна отримати за допомогою КСУТО або електронною поштою. Цей запит на виконання робіт схвалений керівником ТО. Перевірка обладнання, розстановка запчастин, наявність машини (з виробництва) здійснюється планувальником ТО. Ремонтні роботи виконує технік з ТО, робота та запчастини вбиваються в програмне забезпечення. Ця робота перевіряється керівником/планувальником ТО. Замовлення на виконання робіт оцінюється та закривається за погодженням власника обладнання.

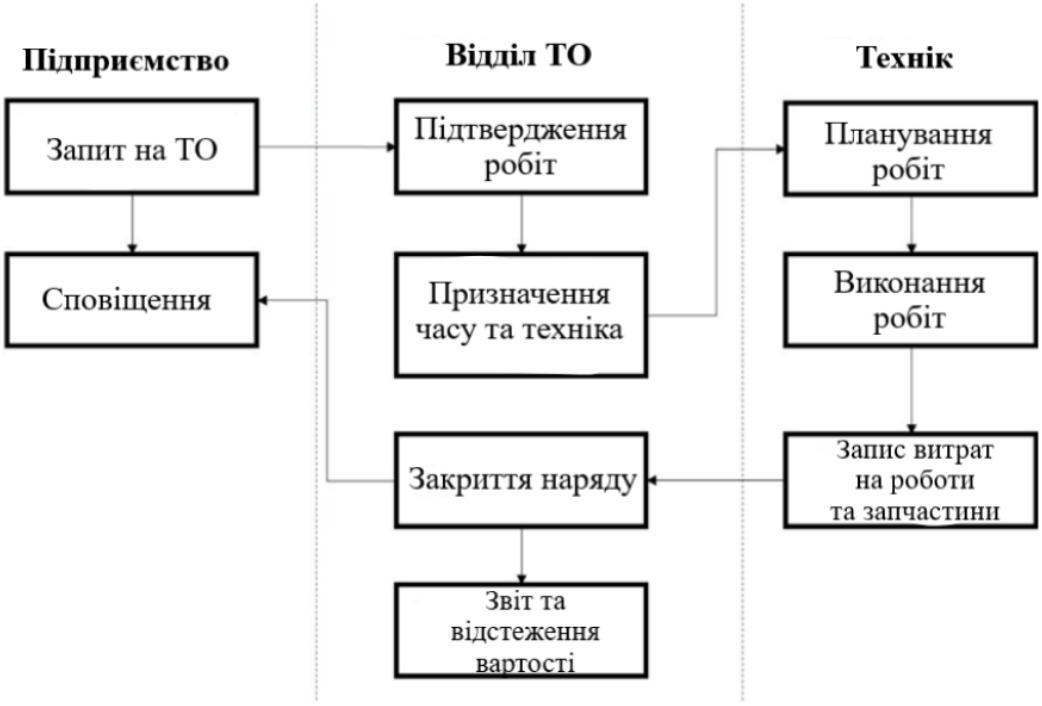


Рисунок 3.10 - Типовий процес виконання замовлення

a) Типи нарядів

Відповідно до стратегій технічного обслуговування роботи з ТО можна розділити на дві великі категорії: заплановані та незаплановані[53]. Заплановані наряди на виконання робіт групуються під ПТО, а позапланові поломки групуються під коригувальне обслуговування (КО) та аварійні роботи. Додаткові типи також можуть включатись в КСУТО, такі як капітальний проект і проактивне обслуговування.

b) Стан наряду на виконання робіт

Статус робочого замовлення висвітлює поточний стан виконання замовлення. Спочатку робоче замовлення знаходиться у вільному стані, яке перетворюється на запланований статус, коли воно заплановано на певну дату, час і призначено конкретному техніку. Після завершення роботи керівник заповнює і закриває наряд.

в) Текст наряду на виконання робіт

Текст замовлення надає інформацію про проблему, яка називається текстом замовлення. Для майбутнього аналізу першопричин, текст діяльності та рішення також додається, щоб надати уявлення про те, у чому була проблема та як проблема була вирішена. Альтернативне рішення для створення кодів відмов у КСУТО для виявлення несправностей обладнання. Для цього не потрібно писати довгі деталі в текстовому полі.

3.3.4 Планування профілактичного обслуговування

Планування профілактичного обслуговування є найважливішою функцією програмного забезпечення КСУТО. Для кожного обладнання в реєстрі активів план ПТО створюється на термін не менше одного року. Загальна кількість запланованих нарядів на роботу базується на частоті ПТО. Наприклад, у морозильному тунелі ОЧУ є план ТО на кожен тиждень, тому система генерує 52 заплановані робочі замовлення на один рік. Пізніше цей план ПТО планується на певні дати (що стосується плану виробництва та наявності активу) і перетворюється на робочі замовлення щотижня. Попереднє планування — це те, що потрібно зробити та як це буде зроблено, а планування — це те, коли і де це буде зроблено. У модулі планування ПТО діяльність з технічного обслуговування (контрольний список) і процедури пов’язані з реєстром активів на основі наступних факторів:

— Контрольний перелік профілактичного обслуговування
— Періодичність профілактичного обслуговування
— Необхідні запасні частини та інструменти для виконання робіт з технічного обслуговування

Входи, вихід, ресурси та функції керування для модуля планування профілактичного обслуговування(рис 3.11)[29]. Вхідні дані включають заходи з технічного обслуговування, частоту ПТО, робочі години, запасні частини та інструменти. Ці вхідні дані перетворюються на результати, такі як план ПТО, графік, необхідна кількість запасних частин, інструменти та робочі години.

Ресурси механізмів, доступних для планування ПТО, - це OEM-керівництво з ТО, програмне забезпечення КСУТО, історія несправностей обладнання та зворотний зв'язок оператора для потреб ТО обладнання. Контроль включає перевірку, управлінський нагляд та якість.

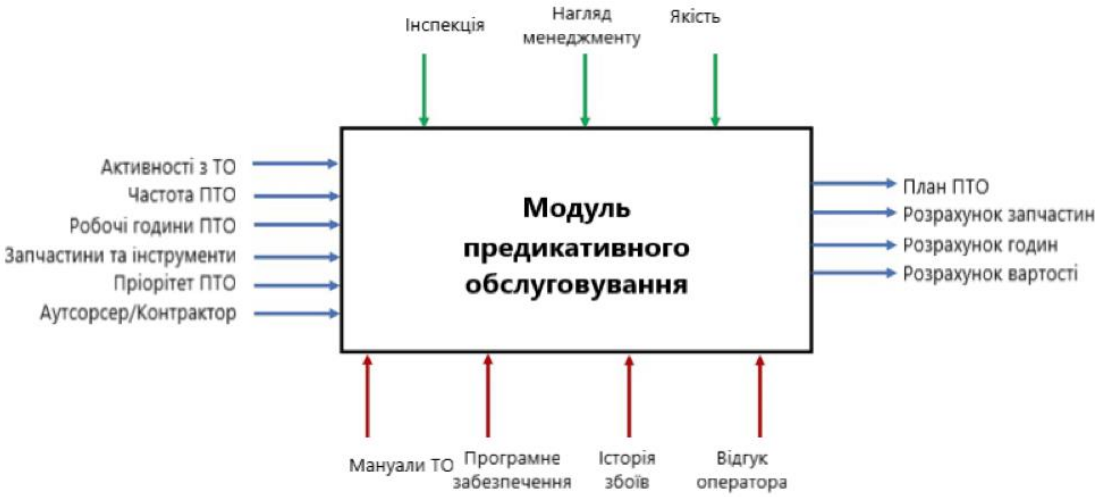


Рисунок 3.11 - Функції входів та виходів для модуля профілактичного обслуговування

а) Людські ресурси

Інженери, техніки та оператори з ТО реєструються в КСУТО зі своїм унікальним ідентифікатором зайнятості, ім’ям, відділом, нормальним робочим часом, понаднормовим робочим часом, набором навичок, погодинною ставкою та контактними даними. Техніку доступні 160 робочих годин (5 робочих днів X 8 робочих годин на день)[54]. Загальна кількість годин, відпрацьованих техніком, відображає його продуктивність.

3.3.5 Управління запасами

Модуль управління запасами складається з трьох частин; склад, заявка на закупівлю, замовлення на закупівлю. Складський модуль показує наявний запас запчастин на складському сховищі з їх кількістю та місцем розташування. Модуль заявки на закупівлю відображає запит на придбання запасних частин від постачальників. Список затверджених постачальників також доступний у програмному забезпеченні КСУТО. Модуль замовлення на закупівлю відображає затверджені заявки на закупівлю запасних частин.

3.3.6 Бюджетування та планування

Система КСУТО є дуже корисним інструментом для відстеження бюджету обслуговування та управління витратами. Витрати на ТО поділяються на дві частини: експлуатаційні витрати і капітальні витрати. Бюджет експлуатаційних витрат спрямовується на витрати, які включають заробітну плату персоналу відділу технічного обслуговування, закупівлю запчастин, придбання інструментів для ремонту та технічного обслуговування сторонніх організацій. Капітальні витрати зарезервовані для придбання нового обладнання та встановлення проектів.

3.3.7 Звіти про технічне обслуговування

КСУТО має дуже потужні функції звітності. Ці звіти можна створювати з гнучкістю часу, тривалості (день, місяць рік), розташування, обладнання, співробітників. У таблиці 3.4 наведені різні типи звітів з модулів КСУТО.

Таблиця 3.4 – звіти КСУТО

Модуль КСУТО	**Звіти**
Реєстр активів	- Звіт про головний список активів - Кількість активів у певному місці
Наряд на роботу	- Звіти про робочі накази ПТО - Звіти про робочі наряди СМ - Звіт про співвідношення ПТО/СМ - Звіт про відповідність ПТО
Превентивне обслуговування	- Звіт плану профілактичного обслуговування - Звіт розкладу ПТО
Управління запасами	- Звіт про споживання запасних частин - Звіт про запаси складу - Звіти про закупівлю запасів - Звіт про інвентаризацію
Бюджетування та планування	- Звіти про витрати на технічне обслуговування - Звіти OPEX/CAPEX - Звіт про бюджет і витрати - Звіт про відхилення бюджету

Зразок звіту про технічне обслуговування (рис. 3.12)[55]. На рисунку показано кількість замовлень на обслуговування, загальну вартість, робочі години, вартість робочої сили та вартість запасних частин для чотирьох установок у компанії.

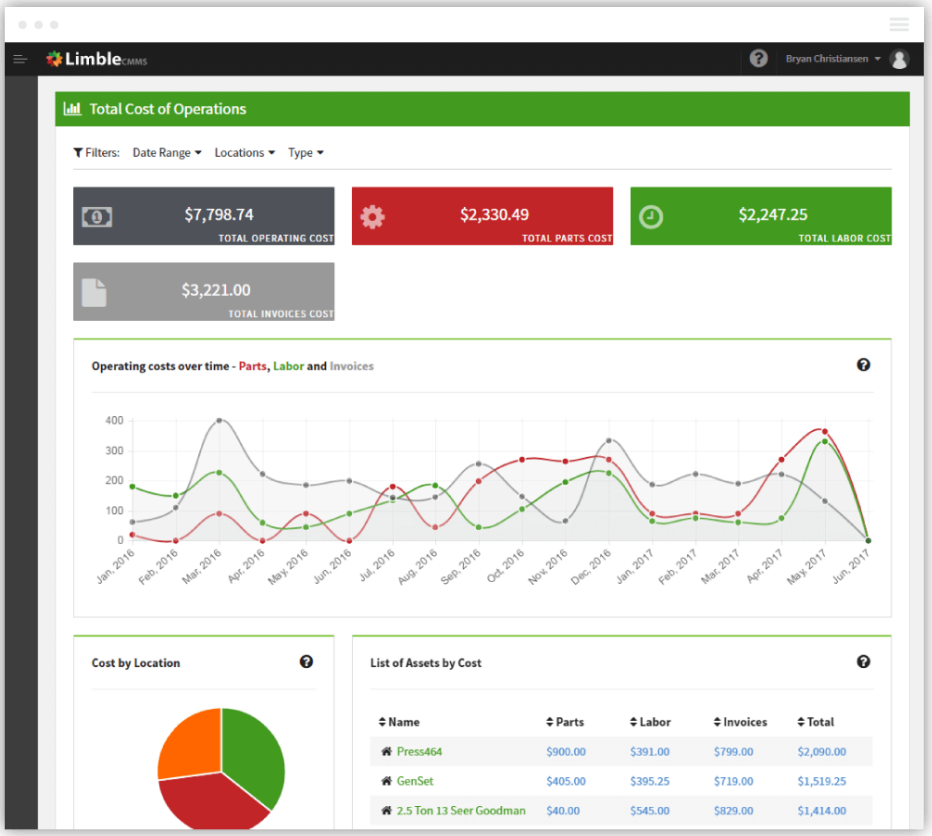


Рисунок 3.12 - Звіти про технічне обслуговування

Висновки до розділу 3

У третьому розділі роботи концепції предикативного технічного обслуговування були застосовані до тунелю заморожування ОЧУ для виявлення несправностей і аномалій у критичних компонентах. Були обрані вимірювальні IoT-датчики, а саме: трьохвісний акселерометр, перетворювач струму, магнітні датчики масляного сміття, п’єзоелектричні датчики для вимірювання стану критичних компонентів у реальному часі. Дані про критичні компоненти тунелю заморожування ОЧУ, їх потенційні частини відмов, техніку моніторингу їх стану із застосуванням відповідних обраних датчиків, а також алгоритм обробки цих даних були структуровані у вигляді таблиці. На основі інформації, виведеної у минулих розділах та датчиків, застосованих до заморожувального тунелю ОЧУ було проведено процес прогнозування «здоров’я» одного з критичних компонентів. Цим компонентом була коробка передач із частотою обертання 1440 об/хв, на зовнішній поверхні корпусу підшипника якої був встановлений

тривісний акселерометр для проведення вібраційного аналізу, який використовується для діагностики несправностей передач у коробці. Дослідження проводилось для справної передачі та передачі зі зламаним зубцем. Вилучені сигнали містили шум, тому були використані три вейвлет-схеми знешумлення а саме аналіз основних компонентів, емпірична модова декомпозиція, коефіцієнт Нейкоеффа, а також адаптивний поріг, для порівняння отриманих результатів. Кожна схема була розглянута окремо та за допомогою середовища MatLab використана для знешумлення сигналу в результаті чого були отримані графіки для справної та несправної передач. В результаті було зроблено висновок, що алгоритми АОК та АП дозволяють простіше всього ідентифікувати несправність у коробці передач. Після цього, за допомогою відповідних формул були отримані значення співвідношення сигнал/шум, ексцесу і середньоквадратичної похибки для чотирьох схем знешумлення та розглянуто порівняння цих схем знешумлення за допомогою багатошарової персептронної нейронної мережі. Після проведеного дослідження був проведений системний аналіз загальної архітектури розумної системи предикативного обслуговування та системи КСУТО.

РОЗДІЛ 4. ВИДІЛЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ПОТЕНЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КСУТО ТА ЇЇ КАСТОМІЗАЦІЯ

4.1 Критерії оцінки КСУТО

Для визначення нових можливостей КСУТО першим кроком був проведений аналіз комерційно доступного програмного рішення. Розглядаючи найкращі методи, висвітлені в літературі, та функціональні можливості основного програмного забезпечення КСУТО, був розроблений критерій оцінки для аналізу системи КСУТО. Ці критерії оцінки були засновані на чотирьох ключових характеристиках: користувач, функціональність, фінансові та бізнесові вимоги[56]. Детальний підсумок критеріїв оцінки КСУТО наведено у таблиці Г.1 у **Додатку Г**. Як показано в таблиці, специфікації вимог до користувача програмного забезпечення включають ряд облікових записів користувачів, інтерфейс. Це також включає потребу в додатковому персоналі для адміністрування, операцій та вимог до навчання користувачів для використання програмного забезпечення. Функціональність є найважливішою характеристикою програмного забезпечення КСУТО, функції оцінки включають замовлення на виконання робіт, профілактичне обслуговування, управління запасами, діагностику та прогнозування несправностей тощо. Функції фінансової оцінки включають ліцензування, впровадження, щорічне обслуговування програмного забезпечення та витрати на усунення несправностей. Специфікації бізнес-вимог включають програмне забезпечення, яке вже розгорнуто в подібній галузі, інтеграцію з іншим програмним забезпеченням компанії.

4.2 Існуючі альтернативи програмного забезпечення КСУТО

4.2.1 SAP

SAP має як локальні, так і хмарні обчислення. Для обох рішень існує різна структура цін. Щоб розвинути локальне зберігання даних і можливості аналітики, компанія повинна організувати високопродуктивні графічні процесори для вирішення складних обчислювальних алгоритмів. Завдяки функції підтримки API програмне забезпечення виробничої системи компанії можна інтегрувати з системою SAP, а також можна розробляти індивідуальні

мобільні додатки для обслуговуючого та виробничого персоналу. SAP забезпечує безпеку та конфіденційність даних для системи баз даних компанії (співробітники, програми, клієнти, постачальники). Також є команда підтримки клієнтів для усунення несправностей[57].

4.2.2 IFS

Промислово-фінансова система (Industrial and financial system - IFS) — приватна організація зі Швеції, яка надає послуги ERP та управління активами з 1983 року. Вона не підтримує веб-додатки. Містить основні модулі, такі як управління активами, керування робочими замовленнями, управління запасами, підтримка мобільних пристроїв, планування та планування профілактичного обслуговування. IFS використовує базу даних Oracle. ПЗ не підтримує стан або функцію предикативного обслуговування. Зараз IFS співпрацює з Microsoft Azure над розробкою можливостей прогнозної аналітики в програмному забезпеченні КСУТО[58].

4.2.3 IBM Maximo

Програмне забезпечення MRO Maximo було придбано компанією IBM у 2006 році. Воно широко використовується в середніх виробничих галузях та має веб-сервісну архітектуру. Воно має шість основних модулів включає: управління активами, роботою, обслуговуванням, контрактами, запасами та закупівлями, має широкий спектр функціональних можливостей, параметрів налаштування та інтеграції. Воно має високу гнучкість інтеграції з іншим програмним забезпеченням. Зараз IBM Maximo співпрацює з IBM Watson над розробкою можливостей предикативної аналітики в програмному забезпеченні КСУТО[59]. Існують деякі мінуси, пов’язані з IBM Maximo, такі як складність на етапі впровадження (потрібен додатковий час для тестування та перевірки) та загальна вартість системи. Воно має сильну асоціацію клієнтів у Сполучених Штатах, але обмежений європейський ринок.

4.2.4 INFOR LN

BAAN був придбаний INFOR у 2002 році, воно доступне на ринку з програмним забезпеченням Infor EAM. Його архітектура є веб-основою та

підтримує платформу Java. ПЗ має два варіанти баз даних: Microsoft SQL і Oracle. Infor EAM має широку функціональність та можливості інтеграції. Воно має локальне хмарне сховище: Infor cloud Site. Включає такі основні модулі, як: замовлення на обслуговування, профілактичне обслуговування, мобільний додаток, технічне обслуговування на основі стану. Воно має підтримку ГІС для розподілених активів. Воно має труднощі з інтеграцією з параметрами реального часу, наприклад, Системами PLC і SCADA. Boeing є поважним замовником Infor LN.[60]

4.3 Кастомізація потенційної системи КСУТО

З таблиці А.1 у **Додатку А** (потреби та вимоги користувачів) був зроблений висновок про наступні ключові критерії прийнятності для бажаної системи КСУТО: моніторинг у режимі реального часу, Big Data, хмарне сховище, предикативна аналітика та розумне предикативне обслуговування, а також вимірювання продуктивності. Програмне забезпечення КСУТО повинно мати можливість візуалізувати ці результати у зрозумілій для користувача манері.

З точки зору оператора, КСУТО є найважливішою частиною усієї цифрової трансформації, оскільки більшість інших систем, таких як алгоритми машинного навчання та хмарні платформи можуть бути надані сторонніми постачальниками. Оператору необхідно щодня працювати з КСУТО, і майже всі дані, отримані з морозильного тунелю ОЧУ, будуть зберігатися та представлятись через систему КСУТО. Ця система є основним інтерфейсом між оператором і всією цифровою системою управління технічним обслуговуванням. Таким чином, оператори повинні мати можливість оцінювати, яка з розглянутих вище КСУТО (SAP, IFS, IBM Maximo та Infor LN) є найбільш економічно ефективною для їхніх додатків, підтримувати повноту бачення Індустрії 4.0 та надавати можливості для налаштування. З усього вищенаведеного можна підсумувати, що предикативне обслуговування та вимірювання продуктивності

є ключовими аспектами налаштування, які необхідні для розробки економічно ефективної КСУТО.

а) Варіант рішення №1

Взяття предикативного обслуговування та КСУТО від двох різних постачальників спричиняє проблеми з інтеграцією (різні типи даних). Замість цього, система предикативного технічного обслуговування може бути інтегрована з КСУТО за допомогою інтеграційної платформи з відкритим кодом, наприклад «Machinery Information Management Open Systems Alliance (MIMOSA)». MIMOSA використовує інтеграцію додатків з відкритим вихідним кодом (OSA-EAI) для стандарту обміну даними між фізичними активами та КСУТО[61]. MIMOSA має два типи архітектури; архітектура обробки (OSA-CBM) та інформаційна архітектура (OSA-EAI). В MIMOSA OSA-CBM проводяться вимірювання фізичних параметрів, моніторинг стану та діагностика. Інформаційна архітектура MIMOSA містить у собі КСУТО [62]. Відкрита архітектуру MIMOSA для стандартів процесів та інформації (рис 4.1).

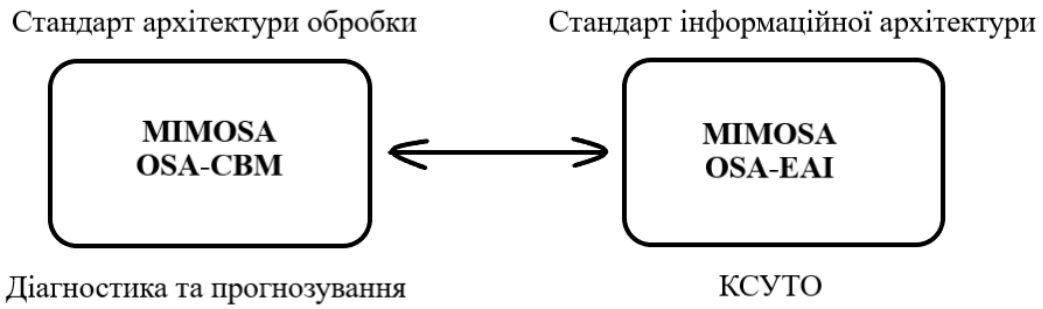


Рисунок 4.1 - Відкрита архітектура MIMOSA

Завдяки недорогим і високонадійним функціям такі організації, як ISO і SAP, приєдналися до OSA-EAI і OSA-CBM для інтеграційних рішень з управління активами. Архітектура відкритої системи MIMOSA для обслуговування на основі умов та інтеграції корпоративних додатків є сумісною з ISO для системи моніторингу стану на основі ISO. Відповідно до стандарту ISO 13374, Опублікований стандарт для відкритих специфікацій програмного забезпечення, який дозволить обробляти, передавати та відображати дані

моніторингу стану машини та інформацію за допомогою різних програмних пакетів без протоколів, що стосуються платформи, постачальника чи апаратного забезпечення[63].

Функціональні можливості MIMOSA-OSA-EAI засновані на загальній концептуально-об'єктній моделі:

— реєстр активів;

— системи управління роботою;

— система моніторингу стану;

— системи діагностики несправностей та оцінки здоров'я;

— вібрація, звук, термографія;

— системи аналізу даних процесів;

— тестові та вимірювальні системи;

— надійність систем баз даних.

Вона може передавати отримані дані, які зберігаються в базі даних. MIMOSA OSA-EAI також має веб-функцію КСУТО (XML-web).

Розумна модель предикативного обслуговування та архітектура з відкритим кодом (OSA-EAI) можуть бути інтегровані. Пропонована структура предикативного технічного обслуговування (рис. 4.2).

Рисунок 4.2 - Пропонований процес предикативного обслуговування

Взаємозв'язок між моделлю розумного предикативного обслуговування та системою КСУТО (рис. 4.3). З рисунка видно, що кожен модуль розумної моделі предикативного обслуговування має прямий доступ до серверів баз даних. Модуль підтримки прийняття рішень щодо ТО взаємодіє з КСУТО через OSA-

CBM, забезпечує OSA0-CBM моніторинг стану компонента та забезпечує опитування в режимі реального часу модулю підтримки ТО. Модуль підтримки прийняття рішень щодо технічного обслуговування взаємодіє з КСУТО для підвищення робочого порядку.

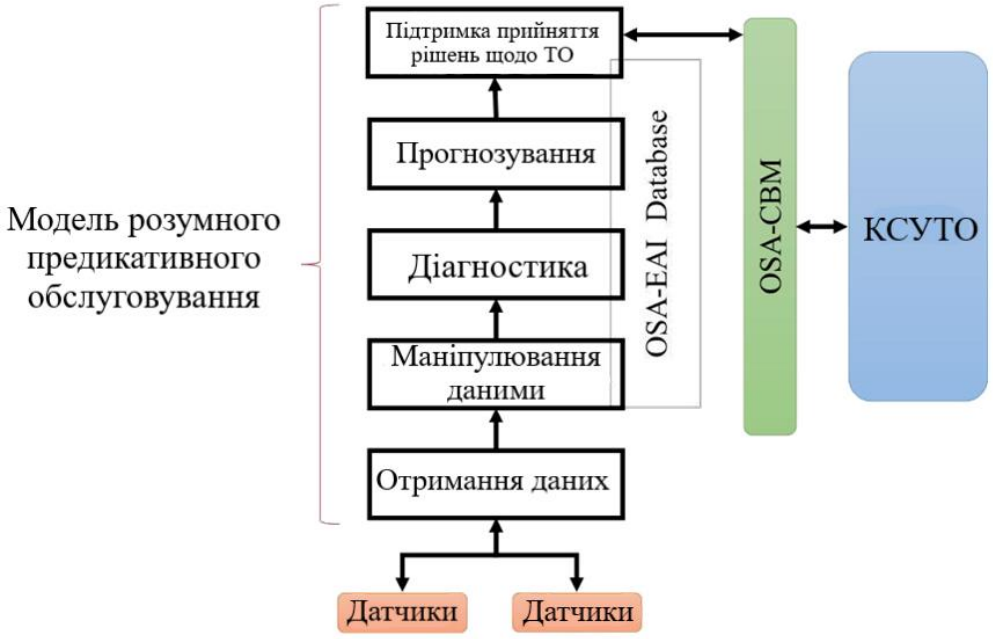


Рисунок 4.3 - Розумна КСУТО з використанням інтелектуальної моделі обслуговування

б) Варіант рішення 2

У цьому варіанті було розроблено багатокритеріальну матрицю рішень (БКМР) на основі оцінки наведених у п. 3.4.2 існуючих рішень для розгортання системи КСУТО для вибору найкращого з них для застосування на потенційному підприємстві. Матриця багатокритеріальних рішень являє собою розгляд кількох критеріїв або цілей з метою ранжування або вибору між декількома альтернативами. Усі фактори, що впливають на користувача, функціональність, фінанси та бізнес, були пронумеровані щодо оцінки постачальника. Крім того, вагові критерії також додаються для оцінки кожного фактора відповідно до його ваги в процесі оцінювання.

Загалом БКМР, складається з таких чотирьох ключових компонентів, як[64]:

1. Альтернативи, які потрібно оцінити чи обрати. Може бути включена будь-яка кількість альтернатив – залежно від застосування. Ці альтернативи – розглянуті постачальники КСУТО, а саме: SAP,IFS, IBM Maximo, Infor LN.

2. Критерії, за якими оцінюються та порівнюються альтернативи, а саме функціональні особливості КСУТО. Список був складений на основі результатів опитування від Carollo щодо потреб до програмного забезпечення КСУТО, а також критеріїв прийнятності, розроблених у таблиці А.1 у **Додатку А**[56, с. 53-55]

3. Вагові показники, що представляють відносну важливість критеріїв

4. Зацікавлені сторони, чиї побажання мають бути представлені. Були виділені зацікавлені сторони згідно таблиці Г.1 у **Додатку Г**.

В результаті було створено таблицю у яку було поміщено усі фактори, що впливають на користувача, функціональність, фінанси та бізнес. Вони були наведені у таблиці з відповідною вагою від 1 до 3 та оцінкою фактора для кожного постачальника також від 1 до 3, що можна інтерпретувати як «погано, «середньо» та «добре». Після цього був підрахований результат для кожного постачальника за рахунок множення значення кожного фактору на його вагу та виведення загальної суми для кожного постачальника. Результат оцінки постачальників за БКМР наведено у таблиці Ґ.1 у **Додатку Ґ**. З результатів, наведених у таблиці Ґ.1, враховуючи основі ваги, надані кожній вимозі, оцінки кожної функції, можна побачити, що постачальник SAP отримав найбільшу суму за всіма показниками – 148, що дозволяє визначити його як найкраще можливе рішення для впровадження в потенційній компанії. Такі важливі функції, як розумне предикативне обслуговування, діагностика несправностей, локальна післяпродажна підтримка, а також досвід на європейському ринку є додатковими провідними факторами у виборі програмного рішення SAP.

Висновки до розділу 4

У розділі 4 основі проведеного аналізу архітектури систем КСУТО разом був виведений критерій оцінки КСУТО, що заснований на чотирьох ключових характеристиках: користувач, функціональність, фінансові та бізнесові вимоги, а також наведені кращі комерційно доступні рішення. Також були наведені варіанти кастомізації для потенційної системи КСУТО, одним з яких стало використання технологій предикативного обслуговування та КСУТО від двох різних постачальників з подальшою інтеграцією двох рішень за допомогою системи MIMOSA, а другим було розроблено багатокритеріальну матрицю рішень на основі наведених в роботі існуючих рішень для визначення найкращого з вже існуючих рішень для впровадження на підприємстві та подальшої кастомізації згідно його вимог. За результатом проведеної оцінки найкращим рішенням для впровадження було виділено компанію SAP.

ВИСНОВОК

Ненадійні, застарілі дані – це відомі скарги менеджерів з обслуговування щодо звітів, створених у КСУТО. Менеджери не дуже покладаються на ці звіти для прийняття рішень. Причина полягає в тому, що дані технічного обслуговування вручну вводяться в робочі наряди операторами або техніками в системі КСУТО. Подібний випадок справедливий і для планів профілактичного обслуговування (щотижня, щомісяця, щоквартально тощо), які були введені в програмне забезпечення КСУТО на основі OEM-рекомендацій без урахування важливих факторів, таких як поточний стан обладнання, історія поломок обладнання та моделі збоїв. Пізніше ці дані були перетворені на робочі наряди, оновлені операторами введення даних і накопичені для створення звітів про результати технічного обслуговування. На жаль, традиційна КСУТО стала лише базою даних, яка не відображала аналізу діяльності цехів у реальному часі. Організації не можуть оптимізувати використання КСУТО. Результатом виконання роботи стало:

1. Виділення ключових вимоги до систем, які формують критерії прийнятності системи КСУТО.

2. Виділення ключових критичних компонентів обладнання та взаємозв'язків між ними.

3. Побудова схеми оснащення критичного компоненту обладнання датчиком для моніторингу та прогнозування його технічного стану за допомогою технологій предикативної аналітики.

4. Побудовано модель кастомізації системи до рівня Індустрії 4.0, на основі зібраної інформації щодо технічного стану компонентів обладнання та виділених критеріїв прийнятності системи КСУТО.

Також було доведено, можливості модернізації існуючого на підприємстві виробничого обладнання та системи управління технічним обслуговуванням до вимог Індустрії 4.0 без їх повної заміни, , що дозволить значно спросити процес переходу та здешевити його.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. DTM_Industrie 4.0 v1 [Електронний ресурс] // European Commission. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://ati.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-06/DTM_Industrie%204.0_DE.pdf. (дата звернення: 11.02.2022)

2. ДСТУ ISO 9000:2015 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА СЛОВНИК ТЕРМІНІВ [Електронний ресурс] // ДП «УкрНДНЦ». – 2016. – Режим доступу до ресурсу: https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/%209000.pdf. (дата звернення: 11.02.2022)

3. The 4th Industrial Revolution, Industry 4.0, Unfolding at Hannover Messe 2014 [Електронний ресурс]. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: https://www.automation.com/en-us/articles/2014-1/the-4th-industrial-revolution-industry-40-unfoldin. (дата звернення: 11.02.2022)

4. Riemer M. Is Your Organization Ready for Industry 4.0? [Електронний ресурс] / Michael Riemer. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: https://medium.com/iotforall/is-your-organization-ready-for-industry-4-0-c4013ee5a283. (дата звернення: 11.02.2022)

5. Lindoff J. Outlining Industry 4.0 [Електронний ресурс] / Jan Lindoff. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: https://doffco.com/onewebmedia/Publikationer/Outlining%20Industry%204.pdf. (дата звернення: 11.02.2022)

6. Cyber Physical Systems: Design Challenges [Електронний ресурс]. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/4336650_Cyber_Physical_Systems_Design_Challenges. (дата звернення: 12.02.2022)

7. What is RFID and How Does RFID Work? [Електронний ресурс] // AB&R Inc. – Режим доступу до ресурсу: https://www.abr.com/what-is-rfid-how-does-rfid-work/. (дата звернення: 12.02.2022)

8. Radiofrequency Identification (RFID) Tags Global Market Report 2022 [Електронний ресурс] // The Business Research Company. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: https://www.reportlinker.com/p06246478/Radiofrequency-Identification-RFID-Tags-Global-Market-Report.html?utm_source=GNW. (дата звернення: 12.02.2022)

9. About the Lab [Електронний ресурс] // Massachusetts Institute of Technology – Режим доступу до ресурсу: https://autoid.mit.edu/about-lab. (дата звернення: 12.02.2022)

10. Harrison L. The Internet of Things (IoT) Vision [Електронний ресурс] / Luke Harrison. – 2015. – Режим доступу до ресурсу:

https://blog.equinix.com/blog/2015/03/12/the-internet-of-things-iot-vision/. (дата звернення: 15.02.2022)

11. Kelley M. IOT IN THE LABORATORY [Електронний ресурс] / Martina Kelley. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: http://docplayer.net/49305696-Iot-in-the-laboratory.html. (дата звернення: 15.02.2022)

12. A Review of Technology Standards and Patent Portfolios for Enabling Cyber-Physical Systems in Advanced Manufacturing [Електронний ресурс] / [A. Trappey, C. Trappey, U. Govindarajan та ін.] // IEEE Access. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7600420. (дата звернення: 15.02.2022)

13. Brush K. DEFINITION virtualization [Електронний ресурс] / K. Brush, B. Kirsch. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: https://www.techtarget.com/searchitoperations/definition/virtualization. (дата звернення: 17.02.2022)

14. Final Version of NIST Cloud Computing Definition Published [Електронний ресурс] // NIST. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: https://www.nist.gov/news-events/news/2011/10/final-version-nist-cloud-computing-definition-published. (дата звернення: 17.02.2022)

15. BIG DATA: THE 3 VS EXPLAINED [Електронний ресурс] // BigDataNews. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://bigdataldn.com/news/big-data-the-3-vs-explained/. (дата звернення: 20.02.2022)

16. Leetaru K. A Reminder That Machine Learning Is About Correlations Not Causation [Електронний ресурс] / Kalev Leetaru // Forbes. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://www.forbes.com/sites/kalevleetaru/2019/01/15/a-reminder-that-machine-learning-is-about-correlations-not-causation/?sh=75ad25676161. (дата звернення: 20.02.2022)

17. Brown S. Machine learning, explained [Електронний ресурс] / Sara Brown // Management Sloan School. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/machine-learning-explained. (дата звернення: 20.02.2022)

18. Wakefield K. A guide to the types of machine learning algorithms and their applications [Електронний ресурс] / Katrina Wakefield // SAS UK – Режим доступу до ресурсу: https://www.sas.com/en_gb/insights/articles/analytics/machine-learning-algorithms.html. (дата звернення: 21.02.2022)

19. Gong D. Top 6 Machine Learning Algorithms for Classification [Електронний ресурс] / Destin Gong // Towards Data Science. – 2022. – Режим доступу до ресурсу:

https://towardsdatascience.com/top-machine-learning-algorithms-for-classification-2197870ff501. (дата звернення: 21.02.2022)

20. Supervised Learning [Електронний ресурс] // IBM Cloud Education. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://www.ibm.com/cloud/learn/supervised-learning. (дата звернення: 21.02.2022)

21. Wright L. Current uses of predictive analytics in asset management [Електронний ресурс] / Lindsay Wright // Assesitivity. – 2016 - Режим доступу до ресурсу: https://www.assetivity.com.au/articles/maintenance-management/current-use-of-predictive-analytics-in-asset-management/ (дата звернення: 21.02.2022)

22. Ragab A. Prognostics of multiple failure modes in rotating machinery using a pattern-based classifier and cumulative incidence functions [Електронний ресурс] / A. Ragab, S. Yacout, H. Osman. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://dl.acm.org/doi/10.1007/s10845-016-1244-8. (дата звернення: 23.02.2022)

23. Stefanovskiy O. Predictive Maintenance Part 1: The Domain Overview [Електронний ресурс] / Oleksandr Stefanovskiy // Intelliarts. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: https://www.ai.intelliarts.com/post/predictive-maintenance-the-domain-overview. (дата звернення: 23.02.2022)

24. ISO 17359:2011 Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines [Електронний ресурс] // ISO. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: https://www.iso.org/standard/39912.html. (дата звернення: 23.02.2022)

25. Li Z. Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: Industry 4.0 scenario - [Електронний ресурс] / Zhe Li, Wang Yi // - 2017. - Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/321578613_Intelligent_predictive_maintenance_for_fault_diagnosis_and_prognosis_in_machine_centers_Industry_40_scenario (дата звернення: 23.02.2022)

26. Kumar A. settings Open AccessReview An Overview of IoT Sensor Data Processing, Fusion, and Analysis Techniques [Електронний ресурс] / A. Kumar, R. Krishnamurthi, D. Gopinathan // MDPI. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/21/6076/htm. (дата звернення: 03.03.2022)

27. What does CMMS stand for? [Електронний ресурс] / AcronymAttic // - Режим доступу до ресурсу: https://www.acronymattic.com/Computer-Managed-Maintenance-System-(CMMS).html. (дата звернення: 03.03.2022)

28. What is a computerized maintenance management system (CMMS)? [Електронний ресурс] // IBM – Режим доступу до ресурсу: https://www.ibm.com/nl-en/topics/what-is-a-cmms. (дата звернення: 03.03.2022)

29. Soliman M. CMMS - From Theory to Execution [Електронний ресурс] / Mohammed Soliman. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: https://www.slideshare.net/MohammedHamedAhmedSo/cmms-45946811. (дата звернення: 03.03.2022)

30. Bergen A. CMMS Trends: Future of CMMS for 2022 [Електронний ресурс] / Adair Bergen // SelectHub. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://www.selecthub.com/cmms/cmms-buying-trends/. (дата звернення: 03.03.2022)

31. 3 ways blockchain will enhance your asset management efforts [Електронний ресурс] // IBM. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/iot-blockchain-enhances-asset-management/. (дата звернення: 04.03.2022)

32. IBM Maximo named a Leader in Gartner Magic Quadrant for Enterprise Asset Management! [Електронний ресурс] // IBM. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://www.ibm.com/support/pages/ibm-maximo-named-leader-gartner-magic-quadrant-enterprise-asset-management. (дата звернення: 04.03.2022)

33. Argval K. Top CMMS Selection Requirements and Functions [Електронний ресурс] / Kriti Argval // SelectHub. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: https://www.selecthub.com/cmms/ten-top-cmms-requirements/. (дата звернення: 05.03.2022)

34. Lopes I. Requirements specification of a computerized maintenance management system – a case study [Електронний ресурс] / Isabel Lopesa, Patrícia Senraa, Sandrina Vilarinho // ScienceDirect – 2018 / - Режим доступу до ресурсу: https://core.ac.uk/download/pdf/82167739.pdf (дата звернення: 05.03.2022)

35. 5 reasons why your business needs a CMMS software [Електронний ресурс] / Valuekeep // - Режим доступу до ресурсу: https://valuekeep.com/resources/blog/reasons-why-your-business-needs-a-cmms/ (дата звернення: 05.03.2022)

36. SRT Carton Freezer & Cooler Електронний ресурс] / Hans Jensen Engineering // - http://hj-galten.com/products/srt-carton-freezer-cooler/ (дата звернення: 20.03.2022)

37. HJ50 Freezing Tunnel User Manual, 2010, Hans Jensen Engineering. (дата звернення: 20.03.2022)

38. SIEMENS S7 PLC – SIMATIC S7 PLC PROGRAMMING [Електронний ресурс] // Aotewell – Режим доступу до ресурсу: https://www.aotewell.com/siemens-automation/siemens-s7-plc-simatic-s7-plc-programming. (дата звернення: 28.03.2022)

39. Introduction To Basic Refrigeration [Електронний ресурс] // Berg Chilling Systems Inc.. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: https://berg-group.com/engineered-solutions/the-science-behind-refrigeration/. (дата звернення: 30.03.2022)

40. The 4 Main Refrigeration Cycle Components [Електронний ресурс] // Super Radiator Coils. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: https://www.superradiatorcoils.com/blog/4-main-refrigeration-cycle-components. (дата звернення: 30.03.2022)

41. Making maintenance smarter Predictive maintenance and the digital supply network [Електронний ресурс] // Deloitte. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3828_Making-maintenance-smarter/DUP_Making-maintenance-smarter.pdf. (дата звернення: 01.04.2022)

42. Jollife I. Principal component analysis: a review and recent developments [Електронний ресурс] / I. Jollife, J. Cadima // Doi. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2015.0202. (дата звернення: 01.04.2022)

43. Romero I. PCA and ICA applied to noise reduction in multi-lead ECG [Електронний ресурс] / Romero // IEEEXplore. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: https://ieeexplore.ieee.org/document/6164640. (дата звернення: 04.04.2022)

44. Two-stage image denoising by principal component analysis with local pixel grouping [Електронний ресурс] / L.Zhang, D. Weisheng, D. Zhang, G. Shi // doi. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0031320309003677. (дата звернення: 04.04.2022)

45. Chacko A. Denoising of ECG signals using Empirical Mode Decomposition based technique [Електронний ресурс] / A. Chacko, A. Samit // IeeeXplore. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: https://ieeexplore.ieee.org/document/6215963. (дата звернення: 05.04.2022)

46. Wang X. Multiwavelet denoising with improved neighboring coefficients for application on rolling bearing fault diagnosis [Електронний ресурс] / X. Wang, Y. Zi, Z. He // ResearchGate. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/223916861_Multiwavelet_denoising_with_improved_neighboring_coefficients_for_application_on_rolling_bearing_fault_diagnosis. (дата звернення: 05.04.2022)

47. Application of Multiwavelet Adaptive Threshold Denoising in the Fault Diagnosis of Gearbox [Електронний ресурс] / [W. Li, J. Zhang, L. Cui та ін.] // IeeeXplore. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: https://ieeexplore.ieee.org/document/5720843. (дата звернення: 10.04.2022)

48. Evaluation of Effectiveness of Wavelet Based Denoising Schemes Using ANN and SVM for Bearing Condition Classification [Електронний ресурс] / G.Vilay, H. Kumar, P. Srinvasa, N. Sriram // Hindawi. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: https://www.hindawi.com/journals/cin/2012/582453/. (дата звернення: 10.04.2022)

49. Kreidl M. Condition Indicators for Gearbox Condition Monitoring Systems [Електронний ресурс] / M. Kreidl, R. Smid // ResearchGate. – 2005. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/200706575_Condition_Indicators_for_Gearbox_Condition_Monitoring_Systems. (дата звернення: 12.04.2022)

50. Saravanan V. Fault diagnosis of spur bevel gear box using artificial neural network (ANN), and proximal support vector machine (PSVM) [Електронний ресурс] / V. Saravanan, K. Siddabattuni, K. Ramachandran // ACM Digital Library. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: https://dl.acm.org/doi/abs/10.1016/j.asoc.2009.08.006. (дата звернення: 12.04.2022)

51. Big Data Analytics for Predictive Maintenance Modeling: Challenges and Opportunities [Електронний ресурс] / [I. Santos, M. Machado, E. Russo та ін.] // OTC Brasil. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/314698930_Big_Data_Analytics_for_Predictive_Maintenance_Modeling_Challenges_and_Opportunities. (дата звернення: 15.04.2022)

52. What is a Work Order? [Електронний ресурс] // Emaint – Режим доступу до ресурсу: https://www.emaint.com/works/what-is-a-work-order/. (дата звернення: 15.04.2022)

53. Unplanned maintenance [Електронний ресурс] // Fiixsoftware – Режим доступу до ресурсу: https://www.fiixsoftware.com/maintenance-strategies/unplanned-maintenance/. (дата звернення: 17.04.2022)

54. Кодекс законів про працю України [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: https://ips.ligazakon.net/document/KD0001?utm_source=buh.ligazakon.net&utm_medium=news&utm_content=cons12&_gl=1*1xn0d47*_ga*MzY2MzgxMTY2LjE2NTMwMzcxMzg.*_ga_DTFQWX6QG5*MTY1MzAzNzEzNy4xLjEuMTY1MzAzNzE3Ni4w&_ga=2.127545928.455128980.1653037138-366381166.1653037138. (дата звернення: 17.04.2022)

55. What to Look for in Manufacturing Maintenance Software [Електронний ресурс]. // Limble CMMS / - Режим доступу до ресурсу: https://limblecmms.com/blog/manufacturing-maintenance-software-guide/ (дата звернення: 18.04.2022)

56. COMPUTERIZED MAINTENANCE MANAGEMENT SYSTEM ASSESSMENT [Електронний ресурс]. // Carollo / - 2016 - Режим доступу до ресурсу: https://www.oxnard.org/wp-content/uploads/2016/04/PM-1.2.2.pdf (дата звернення: 20.04.2022)

57. What is an SAP CMMS system? [Електронний ресурс] // Ondevicesolutions. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://ondevicesolutions.com/what-is-an-sap-cmms-system/. (дата звернення: 20.04.2022)

58. IFS CMMS [Електронний ресурс] // Comparesoft – Режим доступу до ресурсу: https://comparesoft.com/cmms-software/ifs-maintenance-management-system/. (дата звернення: 22.04.2022)

59. Maximo CMMS Overview: What It Does, Who It's For & More [Електронний ресурс] // Camcode. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: https://www.camcode.com/blog/maximo-cmms-overview-what-it-does-who-its-for-more/. (дата звернення: 22.04.2022)

60. Enterprise Resource Planning (ERP) Infor LN [Електронний ресурс] // INFOR LN – Режим доступу до ресурсу: https://www.infor.com/solutions/erp/ln. (дата звернення: 22.04.2022)

61. MIMOSA OSA-EAI [Електронний ресурс] // MIMOSA Inc. – Режим доступу до ресурсу: https://www.mimosa.org/mimosa-osa-eai/. (дата звернення: 25.04.2022)

62. MIMOSA OSA-CBM [Електронний ресурс] // MIMOSA – Режим доступу до ресурсу: https://www.mimosa.org/mimosa-osa-cbm/. (дата звернення: 25.04.2022)

63. ISO 13374-4:2015 [Електронний ресурс] // ISO. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13374:-4:ed-1:v1:en. (дата звернення: 27.04.2022)

64. What is MCDA / MCDM [Електронний ресурс] // 1000minds – Режим доступу до ресурсу: https://www.1000minds.com/decision-making/what-is-mcdm-mcda. (дата звернення: 28.04.2022)

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – загальні потреби та вимоги до систем КСУТО.

Вимоги	Потреби
Для вирішення своїх бізнес-потреб компанії необхідна система управління технічним обслуговуванням	Система повинна мати можливість отримувати дані технічного обслуговування для всіх активів.
Система повинна реєструвати всю інформацію про технічне обслуговування активів, зацікавлених сторін та акціонерів, а також міцні відносини з іншим програмним забезпеченням компанії.	Система повинна працювати з центральним фокусом для отримання всієї інформації для менеджерів з обслуговування.
Система повинна мати можливість розпізнавати проблеми з обладнанням і вчасно повідомляти про них.	Система повинна вміти виявляти помилки, несправності та усунення несправностей обладнання.
Програмне забезпечення повинно мати найактуальнішу інформацію про стан обладнання.	Програмне забезпечення повинно мати доступ до даних від датчиків машини у режимі реального часу.
Обладнання та програмне забезпечення повинні мати можливість надсилати й отримувати інформацію.	Дані про стан машини повинні зберігатися таким чином, щоб програмне забезпечення могло отримати до них доступ.
Інформація має надсилатися програмному забезпеченню автоматично.	Програмне забезпечення повинно здійснювати обробку даних, отриманих від датчиків). Система повинна мати можливість швидко передавати важливі дані з обладнання.
Система повинна мати можливість розпізнавати всі датчики.	Програмне забезпечення повинно мати можливість збирати дані з різних джерел, типів і форматів. Система повинна мати можливість зберігати та обробляти велику кількість даних.

Система повинна працювати без взаємодії з людьми.	Програма повинна працювати в автоматичному режимі.
Усі технічні працівники повинні мати можливість користуватися системою.	У програмі має бути достатньо облікових записів та техніки мають бути навчені користуватися програмним забезпеченням.
Виведнення програмного забезпечення повинне бути зрозумілим.	Вихідні дані мають бути представлені у вичерпній та узагальненій формі.
Система повинна забезпечувати конфіденційність даних.	Система повинна бути безпечною для роботи та використання.

Додаток Б

Таблиця Б.1 - Ефекти режиму відмови та аналіз критичності тунелю заморожування ОЧУ

№	Запчастина	Функція або вимога	Потенційна відмова	Потенційна причина відмови	Поширеність	Серйозність	Ймовірність	НПР	Необхідна дія
1	Головний двигун	Привід лотків стелажів	Зупинка стелажів	Коротке замикання	1	2	2	4	Ізоляція та ремонт
				Замикання на масу	1	2	3	6	Ізоляція та ремонт
				Низький рівень оливи	1	2	1	2	Долити оливу та замінити запчастини
				Обламаний зубець коробки передач	1	2	1	2	Заміна
				Зниження напруги	1	2	3	6	Ізоляція та ремонт
				Відключення від перевантаження	2	3	3	18	Ізоляція та ремонт
				Загартовування кабелів	1	2	2	4	Заміна та ремонт
2	Підшипник	Робить можливим обертання	Зупинка стелажів / конвеєрів	Недостатнє змазування	2	3	2	12	Змазування
				Перегрів	1	2	1	2	Заміна
				Знос	2	3	3	12	Заміна
				Дизбаланс	2	2	3	8	Перевірка та
3	Стелажі	Транспортування плит	Зупинка заморожувача / Вал / Зламаний ролик	Неузгодженість	2	3	2	12	Перевірка та
				Зависока швидкість	2	3	2	12	Зниження швидкості
4	Ланцюг	Трансмісія	Зупинка заморожувача	Натяг ланцюга	1	3	3	9	Перевірка та
				Недостатнє змазування	2	1	2	4	Змазування ланцюга
				Поломка приводу колеса ланцюга	1	1	1	1	Перевірка узгодженості
				Сміття на ланцюгу	2	2	3	12	Чистка
				Вібрація	2	3	3	18	Перевірка натяжіння ланцюга
5	Колесо	Обертання	Обмаланий зубець / Заклинювання колеса	Недостатнє змазування	2	2	2	8	Змазування
				Перевантаження	1	2	3	6	Перевірка та ремонт

ДОДАТОК В

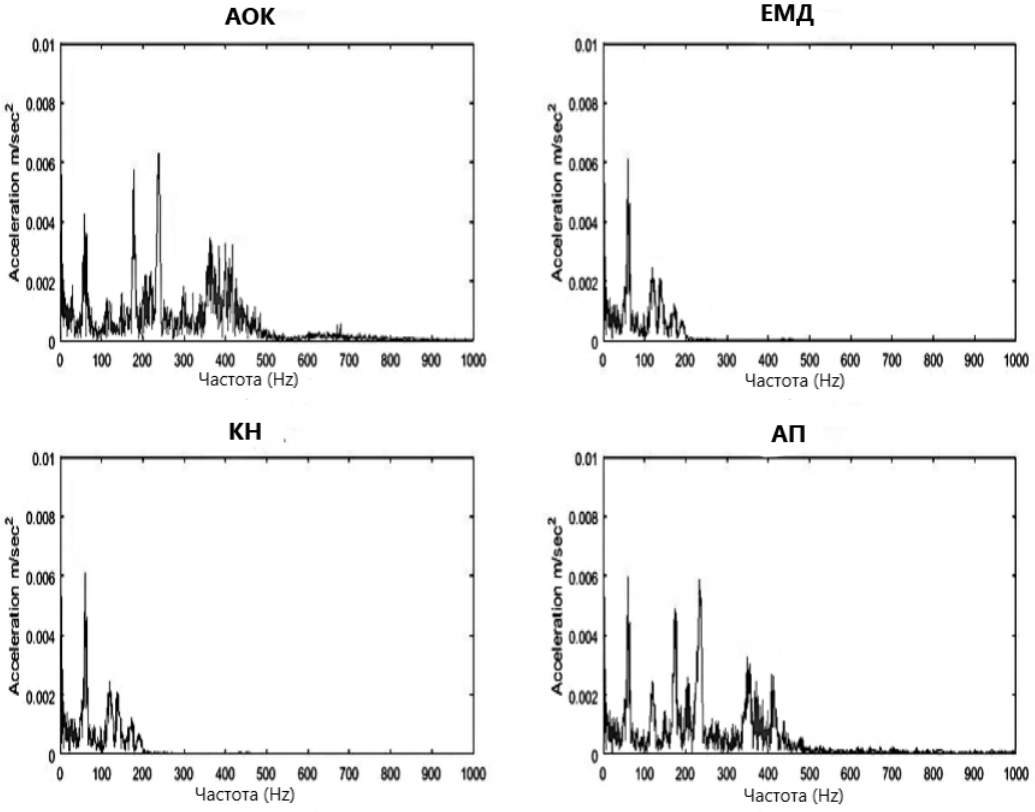


Рисунок В.1 – графіки для справної передачі

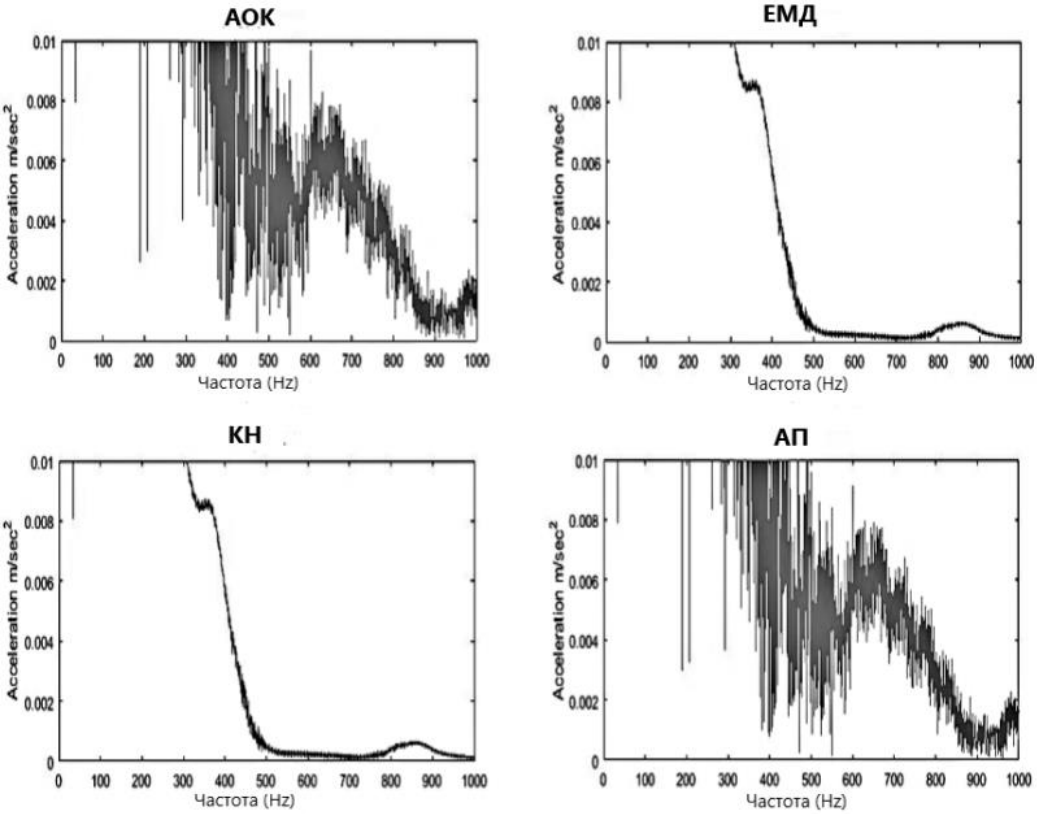


Рисунок В.2 – графіки для несправної передачі

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1 - Критерії оцінки КСУТО

Зацікавлена сторона	Критерії оцінки
Користувач	- Кількість підтримки облікових записів користувачів
	- Легкість доступу
	- Зручний графічний інтерфейс
	- Вимоги до навчання
	- Набір додаткового персоналу в IT.
Функціонал	- Планування профілактичного обслуговування
	- Планування профілактичного обслуговування
	- Відстеження робіт з технічного обслуговування
	- Управління запасами (складування, закупівля, споживання та постачальники)
	- Документація та ведення діловодства
	- Історія технічного обслуговування
	- Роботи з технічного обслуговування сторонніх підрядників (підрядники)
	- Звіти про технічне обслуговування
	- Хмарні послуги (локальне або зовнішнє хмарне сховище)
	- Безпека даних
	- Мобільність
	- Веб-інтерфейс програмного забезпечення
	- Інтернет речей (IoT)
	- Діагностика несправностей
	- Технічне обслуговування за умовами
	- Предикативне підтримання здоров'я та вимірювання продуктивності
	- Алгоритми машинного навчання
	- Прогнозування несправності

Фінансова	- Ліцензійна угода про програмне забезпечення
	- Ліцензування на основі модулів
	- Програмна реалізація
	- Вартість річного обслуговування програмного забезпечення
	- Вартість оновлення програмного забезпечення
	- Вартість квитків на усунення несправностей
	- Вартість інтеграції програмного забезпечення з іншим програмним забезпеченням
Бізнес	- Досвід харчової промисловості
	- Інтеграція з програмним забезпеченням для планування виробництва
	- Терміни реалізації проекту
	- Інтеграція з плануванням виробництва та програмним забезпеченням ERP

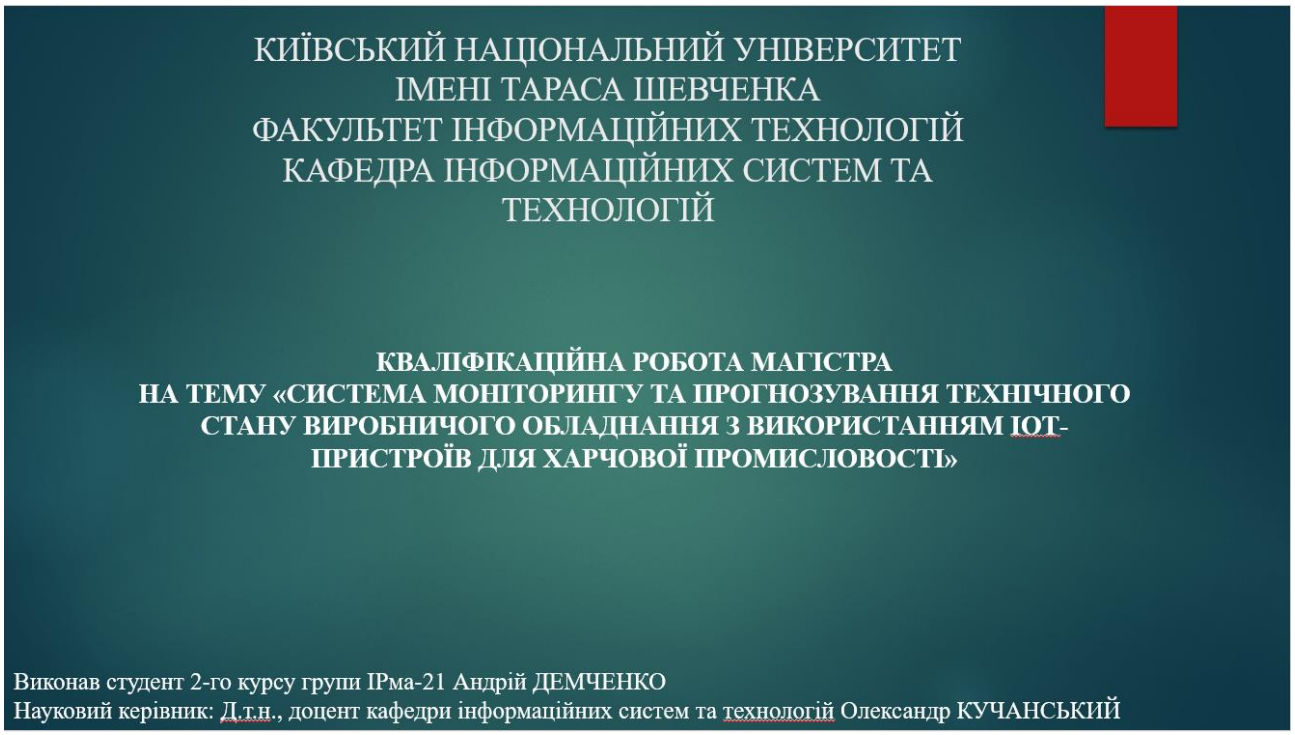
ДОДАТОК Ґ

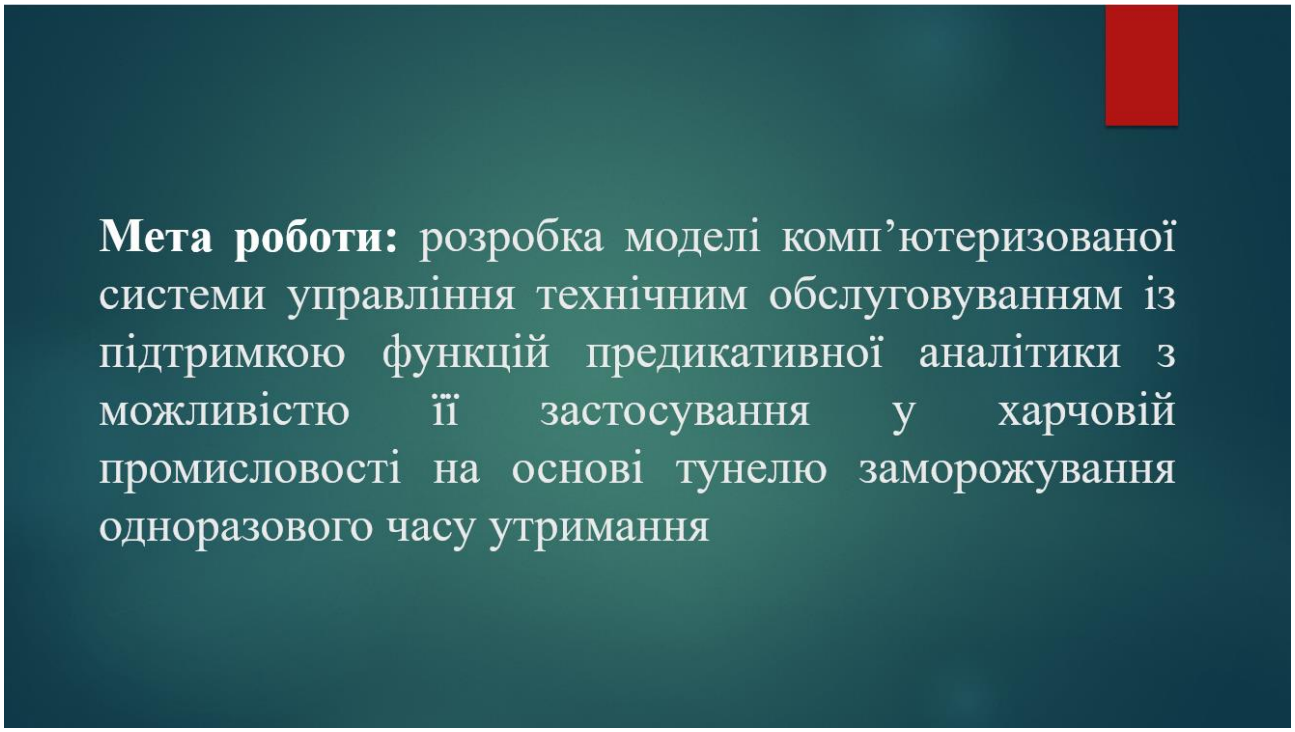
Таблиця Ґ1 – результат БКМР

ЗС	Оцінка особливостей	Вага	SAP	IFS	IBM Maximo	Infor LN
Користувач	Кількість підтримки користувачів	x1	3	3	3	3
	Легкість доступу	x2	3	2	2	2
	Зручний графічний інтерфейс	x2	3	3	3	3
	Вимоги до навчання	x1	2	2	3	2
	Набір додаткового персоналу в IT-відділ.	x2	2	2	3	2
Функціонал	Планування профілактичного технічного обслуговування	x3	3	3	3	3
	Відстеження робіт з технічного обслуговування	x3	3	3	3	3
	Управління запасами (складування, закупівля, споживання та постачальники)	x3	3	3	3	3
	Документація та ведення діловодства	x1	3	3	3	3
	Історія технічного обслуговування	x2	3	3	3	3
	Роботи з технічного обслуговування сторонніх підрядників	x2	3	3	3	3
	Звіти про технічне обслуговування	x3	3	3	3	3
	Хмарні послуги (локальний або зовнішній хмарний сховище)	x1	3	3	3	3
	Безпека даних	x3	3	3	2	3
	Мобільність	x1	3	3	3	3
	Веб-інтерфейс програмного забезпечення	x1	3	3	1	3
	Інтернет речей (IoT)	x1	3	3	1	2
	Діагностика несправностей	x1	3	1	1	2
	Технічне обслуговування за умовами	x1	3	1	1	2
	Предикативне підтримання здоров'я (PdM) і вимірювання продуктивності	x1	3	1	1	2
	Алгоритми машинного навчання	x1	3	1	1	2
	Прогнозуваня несправностей	x1	3	1	1	2
Фінанси	Ліцензійна угода про програмне забезпечення	x3	2	2	2	2
	Ліцензування на основі модулів	x2	2	2	2	2
	Програмна реалізація	x3	2	2	2	2
	Вартість річного обслуговування програмного забезпечення	x1	2	2	2	2
	Вартість оновлення програмного забезпечення	x1	2	2	2	3
	Вартість квитків на усунення несправностей	x2	3	3	3	3
	Вартість інтеграції програмного забезпечення з іншим програмним забезпеченням (ERP/EAM/Production)	x2	2	2	2	3

Бізнес	Досвід харчової промисловості	x1	2	2	2	2
	Кейтеринг-сервіс	x1	2	2	2	2
	Інтеграція з програмним забезпеченням планування виробництва SCALA/ERP	x1	3	3	3	3
	Терміни реалізації проекту	x1	3	2	3	3
	Всього:		**148**	**135**	**132**	**143**

ДОДАТОК Д


КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА
ТЕХНОЛОГІЙ
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА
НА ТЕМУ «СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО
СТАНУ ВИРОБНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ IOT-
ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ»
Виконав студент 2-го курсу групи ІРма-21 Андрій ДЕМЧЕНКО
Науковий керівник: Д.т.н., доцент кафедри інформаційних систем та технологій Олександр КУЧАНСЬКИЙ


Мета роботи: розробка моделі комп'ютеризованої системи управління технічним обслуговуванням із підтримкою функцій предикативної аналітики з можливістю її застосування у харчовій промисловості на основі тунелю заморожування одноразового часу утримання

- **Об’єкт дослідження:** заморожувальний тунель одноразового часу утримання.
- **Предмет дослідження:** комп’ютеризована система управління технічним обслуговуванням з функціями предикативної аналітики

Актуальність роботи:

- Сьогодні якість харчових продуктів є вкрай важливим параметром контролю в галузі товарів широкого вжитку.
- Для більш тривалого зберігання харчових продуктів їх необхідно швидко заморозити після збирання. Цей процес глибокого заморожування може здійснюватися через тунель заморожування ОЧУ.
- Позапланова поломка на етапі обробки призведе до втрати продукції, її якості, вартості робочої сили та вартості запасних частин, тому вкрай важливо підтримувати актив і заздалегідь визначити можливий збій. Через це розробка моделі системи прогнозування технічного стану виробничого обладнання є актуальною.

Визначення загальних потреб та вимог

- Було проведено огляд теоретичних відомостей про такі поняття як: Індустрія 4.0, кіберфізичні системи, інтернет речей, хмарні обчислення та Big Data, а також технологій, пов'язаних з предикативним обслуговуванням.
- Проведений базовий теоретичний аналіз систем КСУТО призвів до визначення необхідних технічних функцій та структуризації загальних потреб та вимог до систем КСУТО

Загальні потреби та вимоги до систем КСУТО – фрагмент таблиці

Вимоги	Потреби
Для вирішення своїх бізнес-потреб компанії необхідна система управління технічним обслуговуванням	Система повинна мати можливість отримувати дані технічного обслуговування для всіх активів.
Система повинна реєструвати всю інформацію про технічне обслуговування активів, зацікавлених сторін та акціонерів, а також міцні відносини з іншим програмним забезпеченням компанії.	Система повинна працювати з центральним фокусом для отримання всієї інформації для менеджерів з обслуговування.
Система повинна мати можливість розпізнавати проблеми з обладнанням і вчасно повідомляти про них.	Система повинна вміти виявляти помилки, несправності та усунення несправностей обладнання.
Програмне забезпечення повинно мати найактуальнішу інформацію про стан обладнання.	Програмне забезпечення повинно мати доступ до даних від датчиків машини у режимі реального часу.
Обладнання та програмне забезпечення повинні мати можливість надсилати й отримувати інформацію.	Дані про стан машини повинні зберігатися таким чином, щоб програмне забезпечення могло отримати до них доступ.
Інформація має надсилатися програмному забезпеченню автоматично.	Програмне забезпечення повинно здійснювати обробку даних, отриманих від датчиків). Система повинна мати можливість швидко передавати важливі дані з обладнання.
Система повинна мати можливість розпізнавати всі датчики.	Програмне забезпечення повинно мати можливість збирати дані з різних джерел, типів і форматів. Система повинна мати можливість зберігати та обробляти велику кількість даних.

Детальний системний аналіз об’єкту дослідження

- Були наведені основні системи тунелю заморожування та проведений розрахунок його виробничої потужності, а також проаналізовані усі процеси життєвого циклу обладнання, наведені зацікавлені сторони(відділи) підприємства.
- Були проаналізовані контекст системи обладнання та можливі збої у його роботі, а також систему автоматизації та управління тунелю, разом із встановленими на ньому датчиками, ПЛК, ЛМІ та можливими системними операціями зі сценаріями операційного використання обладнання.

Тунель заморожування ОЧУ – процес завантаження

Аналіз сценаріїв обслуговування

- Були проаналізовані сценарії обслуговування обладнання та структуровані у вигляді таблиці стратегії його обслуговування.
- В результаті було проведено аналіз дерева відмов обладнання та аналіз відмов FMECA, які дозволили виділити та структурувати у вигляді таблиці основні критичні компоненти обладнання, такі як: головний двигун, підшипник, стелажі, ланцюги та коліщатка. Для цих компонентів були виділені потенційні відмови разом з їх причинами та розрахований показник номеру пріоритету ризику(НПР).

- **НПР = Поширеність * Серйозність * Ймовірність виявлення.**

Дерево відмов заморожувального тунелю ОЧУ

Результат аналізу FMECA

№	Запчастина	Функція або вимога	Потенційна відмова	Потенційна причина відмови	Поширеність	Серйозність	Ймовірність	НПР	Необхідна дія
1	Головний двигун	Привід лотків стелажів	Зупинка стелажів	Коротке замикання	1	2	2	4	Ізоляція та ремонт
				Замикання на масу	1	2	3	6	Ізоляція та ремонт
				Низький рівень оливи	1	2	1	2	Долити оливу та замінити запчастини
				Обламаний зубець коробки передач	1	2	1	2	Заміна
				Зниження напруги	1	2	3	6	Ізоляція та ремонт
				Відключення від перевантаження	2	3	3	18	Ізоляція та ремонт
				Загартовування кабелів	1	2	2	4	Заміна та ремонт
2	Підшипник	Робить можливим обертання	Зупинка стелажів / конвеєрів	Недостатнє змазування	2	3	2	12	Змазування
				Перегрів	1	2	1	2	Заміна
				Знос	2	3	3	12	Заміна
				Дизбаланс	2	2	3	8	Перевірка та
3	Стелажі	Транспортування плит	Зупинка заморожувача / Вал / Зламаний ролик	Неузгодженість	2	3	2	12	Перевірка та
				Зависока швидкість	2	3	2	12	Зниження швидкості
4	Ланцюг	Трансмісія	Зупинка заморожувача	Натяг ланцюга	1	3	3	9	Перевірка та
				Недостатнє змазування	2	1	2	4	Змазування ланцюга
				Поломка приводу колеса ланцюга	1	1	1	1	Перевірка узгодженості
				Сміття на ланцюгу	2	2	3	12	Чистка
				Вібрація	2	3	3	18	Перевірка натяжіння ланцюга
5	Колесо	Обертання	Обмаланий зубець / Заклинювання колеса	Недостатнє змазування	2	2	2	8	Змазування
				Перевантаження	1	2	3	6	Перевірка та ремонт

Застосування концепцій ПТО до тунелю заморожування ОЧУ

- Для виявлення несправностей і аномалій у критичних компонентах. Були обрані вимірювальні IoT-датчики, а саме: трьохвісний акселерометр, перетворювач струму, магнітні датчики масляного сміття, п'єзоелектричні датчики.
- На основі інформації, виведеної у минулих розділах та датчиків, застосованих до заморожувального тунелю було проведено процес прогнозування «здоров'я» одного з критичних компонентів.
- Цим компонентом була коробка передач із частотою обертання 1440 об/хв, на зовнішній поверхні корпусу підшипника якої був встановлений тривісний акселерометр для проведення вібраційного аналізу, який використовується для діагностики несправностей передач у коробці.
- Дослідження проводилось для справної передачі та передачі зі зламаним зубцем.

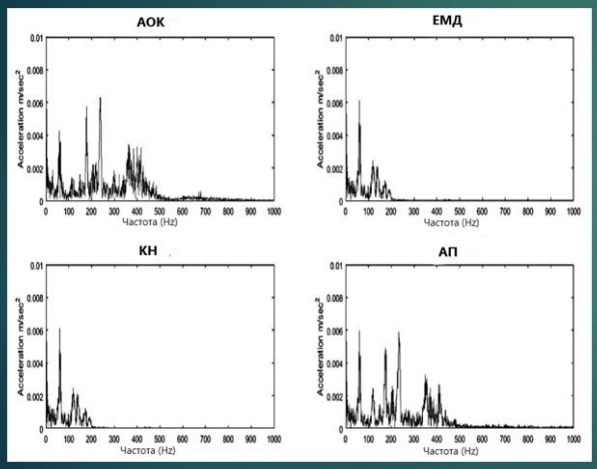
Знешумлення вилучених сигналів

- Вилучені сигнали містили шум, тому були використані Три вейвлет-схеми знешумлення а саме аналіз основних компонентів, емпірична модова декомпозиція, коефіцієнт Нейкоеффа, а також адаптивний поріг, для порівняння отриманих результатів.
- Кожна схема була розглянута окремо та за допомогою середовища MatLab використана для знешумлення сигналу в результаті чого були отримані графіки для справної та несправної передач.
- В результаті було зроблено висновок, що алгоритми АОК та АП дозволяють простіше всього ідентифікувати несправність у коробці передач.

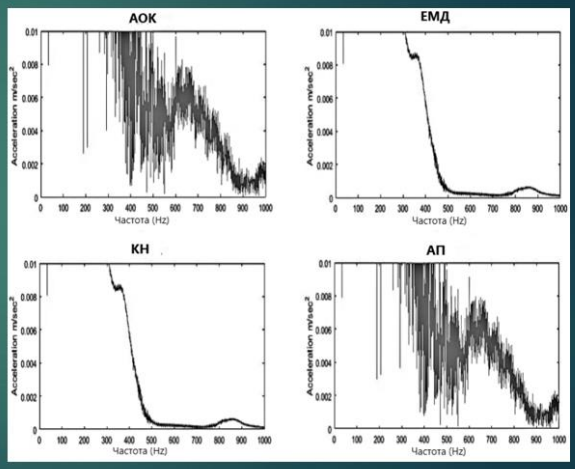
Аналіз основних компонентів

- АОК має здатність зберігати кілька найважливіших основних компонентів та наступним чином.
- 1. Обчислення середнього значення вектора сигналу μ -> $\mu = \frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p} x_k$
- 2. Знаходження матриці коваріантності C -> $C = \frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p}\{x_k - \mu\}\{x_k - \mu\}^T$
- 3. Обчислення власних значень λi та власних векторів νi коваріаційної матриці C -> $(C - \lambda_i I)v_i = 0,$ де $i = 1,2,3$
- 4. Оцінка власних векторів високого значення та розташування власних значень λi в порядку спадання та співставлення вихідного сигналу з власними значеннями. -> $u = x * \lambda_i$

Результати знешумлення



Справна передача



Несправна передача

Порівняння схем знешумлення

- За допомогою відповідних формул були отримані значення співвідношення сигнал/шум, ексцесу і середньоквадратичної похибки для чотирьох схем знешумлення та розглянуто порівняння цих схем знешумлення за допомогою багатошарової персептронної нейронної мережі.

Схема знешумлення	Сигнал/шум		Ексцес		СКВ похибка	
	Справна	Несправна	Справна	Несправна	Справна	Несправна
АОК	75,2255	86,7492	7,9891	110,9242	0,0007	0,0059
ЕМД	4,0023	1,1293	6,2879	84,0883	0,0250	0,3739
КН	8,9233	12,6174	6,9123	93,1260	0,0198	0,2415
АП	74,2168	83,8016	7,9710	110,5836	0,0008	0,0062

Виведення критеріїв оцінки КСУТО

- Після проведеного дослідження був проведений системний аналіз загальної архітектури розумної системи предикативного обслуговування та системи КСУТО разом із кращими комерційно доступними рішеннями.
- На основі проведеного аналізу були виведені критерії оцінки КСУТО, що засновані на чотирьох ключових характеристиках: користувач, функціональність, фінансові та бізнесові вимоги.

Критерії оцінки КСУТО

Зацікавлена сторона	Критерії оцінки
Користувач	- Кількість підтримки облікових записів користувачів
	- Легкість доступу
	- Зручний графічний інтерфейс
	- Вимоги до навчання
	- Набір додаткового персоналу в IT.
Функціонал	- Планування профілактичного обслуговування
	- Планування профілактичного обслуговування
	- Відстеження робіт з технічного обслуговування
	- Управління запасами (складування, закупівля, споживання та постачальники)
	- Документація та ведення діловодства
	- Історія технічного обслуговування
	- Роботи з технічного обслуговування сторонніх підрядників (підрядники)
	- Звіти про технічне обслуговування
	- Хмарні послуги (локальне або зовнішнє хмарне сховище)

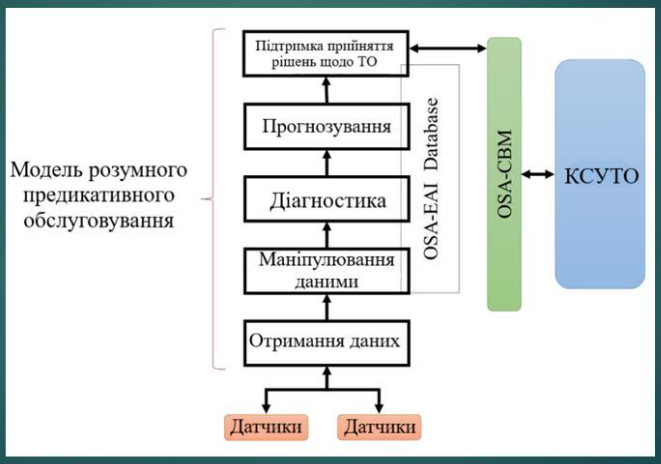
Функціонал	- Звіти про технічне обслуговування
	- Хмарні послуги (локальне або зовнішнє хмарне сховище)
	- Безпека даних
	- Мобільність
	- Веб-інтерфейс програмного забезпечення
	- Інтернет речей (IoT)
	- Діагностика несправностей
	- Технічне обслуговування за умовами
	- Предикативне підтримання здоров'я та вимірювання продуктивності
	- Алгоритми машинного навчання
	- Прогнозування несправності

Фінансова	- Ліцензійна угода про програмне забезпечення
	- Ліцензування на основі модулів
	- Програмна реалізація
	- Вартість річного обслуговування програмного забезпечення
	- Вартість оновлення програмного забезпечення
	- Вартість квитків на усунення несправностей
	- Вартість інтеграції програмного забезпечення з іншим програмним забезпеченням
Бізнес	- Досвід харчової промисловості
	- Інтеграція з програмним забезпеченням для планування виробництва
	- Терміни реалізації проекту
	- Інтеграція з плануванням виробництва та програмним забезпеченням ERP

Варіанти кастомізації

- Були наведені варіанти кастомізації для потенційної системи КСУТО, одним з яких стало використання технологій предикативного обслуговування та КСУТО від двох різних постачальників з подальшою інтеграцією двох рішень за допомогою системи MIMOSA.
- Другим було розроблено багатокритеріальну матрицю рішень на основі наведених в роботі існуючих рішень для визначення найкращого з вже існуючих рішень для впровадження на підприємстві та подальшої кастомізації згідно його вимог. За результатом проведеної оцінки найкращим рішенням для впровадження було виділено компанію SAP.

Модель із використанням MIMOSA



Багатокритеріальна матриця рішень – фрагмент таблиці

Функціонал	Планування профілактичного технічного обслуговування	x3	3	3	3	3
	Відстеження робіт з технічного обслуговування	x3	3	3	3	3
	Управління запасами (складування, закупівля, споживання та постачальники)	x3	3	3	3	3
	Документація та ведення діловодства	x1	3	3	3	3
	Історія технічного обслуговування	x2	3	3	3	3
	Роботи з технічного обслуговування сторонніх підрядників	x2	3	3	3	3
	Звіти про технічне обслуговування	x3	3	3	3	3
	Хмарні послуги (локальний або зовнішній хмарний сховище)	x1	3	3	3	3
	Безпека даних	x3	3	3	2	3
	Мобільність	x1	3	3	3	3
	Веб-інтерфейс програмного забезпечення	x1	3	3	1	3
	Інтернет речей (IoT)	x1	3	3	1	2
	Діагностика несправностей	x1	3	1	1	2
	Технічне обслуговування за умовами	x1	3	1	1	2
	Предикативне підтримання здоров'я (PdM) і вимірювання продуктивності	x1	3	1	1	2
	Алгоритми машинного навчання	x1	3	1	1	2
	Прогнозування несправностей	x1	3	1	1	2

Висновок

- **Результатом виконання роботи стало:**
- 1. Виділення ключових вимоги до систем, які формують критерії прийнятності системи КСУТО.
- 2. Виділення ключових критичних компонентів обладнання та взаємозв'язків між ними.
- 3. Побудова схеми оснащення критичного компоненту обладнання датчиком для моніторингу та прогнозування його технічного стану за допомогою технологій предикативної аналітики.
- 4. Побудовано модель кастомізації системи до рівня Індустрії 4.0, на основі зібраної інформації щодо технічного стану компонентів обладнання та виділених критеріїв прийнятності системи КСУТО.
- Також було доведено можливість модернізації існуючого на підприємстві виробничого обладнання та системи управління технічним обслуговуванням до вимог Індустрії 4.0 без їх повної заміни, , що дозволить значно спросити процес переходу та здешевити його.