Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

(тема)
Удосконалення методу керування промисловими пристроями за допомогою технології IIoT

Виконав: студент 2 курсу, гр. КІТПВм-22-1
Гладков Ігор Олександрович
(прізвище, ініціали)

Спеціальність
151 Автоматизація та компю'терно-інтегровані технології

освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
(код і повна назва напряму)

Тип програми освітньо-професійна
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Новоселов С.П.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри _____ Невлюдов І.Ш.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024 р.

Я Гладков Ігор Олександрович, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

« 18 » Січня 2024р. _____ Гладков І.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	Автоматизація та компю'терно-інтегровані технології
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	151 Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
« 01 » вересня 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Гладкову Ігорю Олекскадровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення методу керування промисловими пристроями за допомогою технології IIoT

затверджена наказом по університету від 03.11. 2023 р. № 1287 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16.01. 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи

3.1 Опрацювати контроль над виробничою ділянкою за допомогою технологій IIoT;

3.2 Розробити модель промислової ділянки та автоматизувати її;

3.3 Розробити панель стеження за найнеобхіднішими процесами на ділянці;

3.4 Забезпечити зберігання інформації в базі даних;

3.5 Середовище реалізації механізму слідкування за підприємством – JavaScript.

4. Перелік питань що потрібно опрацювати

4.1 Аналіз сучасного промислового інтернету речей;

4.2 Математична модель гібридної промислової ділянки;

4.3 Опис виробничої ділянки;

4.4 Моделювання виробничої ділянки;

4.5 Експериментальне дослідження виробничої ділянки;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)
Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Сучасне застосування промислового інтернету речей	12.10.23 – 14.10.23	Виконав
2	Індустрія 4.0	14.10.23 – 15.10.23	Виконав
3	Математична модель гібридного цеху	18.10.23 – 29.10.23	Виконав
4	Опис та моделювання виробничої ділянки	29.10.23 – 02.11.23	Виконав
5	Принцип роботи виробничої лінії сортування	04.11.23 – 15.11.23	Виконав
6	Експериментальне дослідження панелі слідкування за процесом виробничої лінії	16.11.23 – 20.11.23	Виконав
7	Приклад роботи виробничої лінії на базі IIOT	23.11.23 – 12.12.23	Виконав
8	Оформлення пояснювальної записки	12.12.23 – 19.01.24	Виконав
9	Подання роботи на рецензію	24.01.24	Виконав
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри	24.01.24	Виконав

Дата видачі завдання 01.09.2023 р.

Студент _____ Гладков І.О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ проф. Новоселов С.П.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 75 с., 29 рис., 3 дод., 13 джерел.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ІІОТ, ХМАРНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ПРИМИСОЛІ ЛІНІЇ, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, МОДЕЛЮВАНЯ, КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ, ПРОМИСЛОВІ ПРИСТОРОЇ.

Мета дослідження – удосконалення методу керування промисловими пристроями з використанням сучасних технологій Інтернету речей.

Об’єкт дослідження – промислові пристрої та обладнання, які використовуються в різних галузях промисловості.

Предмет дослідження – методи автоматизації промислового обладнання на базі ІІоТ.

Для досягнення нашої мети ми ретельно проаналізували літературу на тему промислового Інтернету речей. Навели приклади їх використання на підприємстві та обрали підходящі механічні пристрої на базі обраних аналогів. Також ми розібрали, на які основні ділянки можна класифікувати даний тип підприємств та привели розрахунки основних параметрів на виробничій лінії. Розробили модель виробничої ділянки на прикладі сортувального механізму за допомогою програмного середовища Coppeliasim та зробили детальний опис того, як механічні роботи взаємодіють між собою через отримані дані. За допомогою мови програмування JavaScript, в особливості бібліотеки Next та Recharts ми навели детальні приклади застосування хмарних технологій та спроектували панель для стеження за всіма необхідними процесами на виробничій ділянці, де надали можливість зберігати інформацію в базі даних та обробляти їх. Отримані дані наша програма обробляє та повертає у вигляді графіків, які змінюються в залежності від поточних даних у реальному часі.

ABSTRACT

Explanatory note: 75 pp., 29 figures, 3 appendices, 13 sources.

AUTOMATION, IIOT, CLOUD TECHNOLOGIES, LINE LINES, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, SIMULATION, DEVICE CONTROL, INDUSTRIAL DEVICES.

The purpose of the research is to develop and implement an effective method of controlling industrial devices using modern Internet of Things technologies.

The object of research is industrial devices and equipment used in various industries.

The subject of research is methods of industrial equipment automation based on IIoT.

To achieve our goal, we carefully analyzed the literature on the topic of the Industrial Internet of Things. Examples of their use at the enterprise were given and suitable mechanical devices were chosen based on selected analogues. We also analyzed the main areas into which this type of enterprise can be classified and calculated the main parameters of the production line. We developed a model of the production site on the example of a sorting mechanism using the Coppeliasim software environment and made a detailed description of how mechanical robots interact with each other through the received data. With the help of the JavaScript programming language, in particular the Next and Recharts libraries, we provided detailed examples of the use of cloud technologies and designed a panel for monitoring all the necessary processes on the production site, where we provided the opportunity to store information in the database and process them. The received data is processed by our program and returned in the form of graphs that change depending on the current data in real time.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

APS – Advanced Planning and Scheduling;

BDA – Big Data Analytics;

DT – Digital Twins;

HMI – Human-Machine Interface;

IIoT – Industrial Internet of Things;

IPv6 – Internet Protocol version 6;

JS – JavaScript;

M2M – Machine-to-Machine;

ML – Machine Learning;

PLC – Programmable Logic Controller;

PPC – Production Planning and Control;

RFID – Radio-Frequency Identification;

SMD – Surface Mount Device;

SMT – Surface Mount Technology;

VF – Virtual Factory.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 7
Вступ 10
1 Сучасне застосування промислового інтернету речей 12
1.1 Застосування промислового інтернету речей 12
1.1.1 Аналіз категорій промислового обладнання 12
1.1.2 Що таке промислове обладнання 12
1.1.3 Аналіз класифікації за різними параметрами 13
1.1.4 Аналіз інтелектуального виробництва «Smart manufacturing» 13
1.1.5 Аналіз обробки великих даних 14
1.1.6 Аналіз просунутої робототехніки 15
1.1.7 Аналіз промисловісті, пристроїв та послуг зв'язку 15
1.1.8 Аналіз усунення неефективності на робочому місці 16
1.2 Індустрія 4.0 17
1.2.1 Основні положення Індустрії 4.0 17
1.2.2 Кіберфізичні системи в розумному виробництві 18
1.3 Фундаментальні ідеї «Industrial Internet of Things» 19
1.3.1 Основні положення «Industrial Internet of Things» 19
1.3.2 Аналіз цифрових двійників 22
1.4 Аналіз ділянки виробничої лінії 24
1.5 Висновки до аналізу літератури 31
2 Математична модель гібридного цеху 32
2.1 Розрахунки норм на підприємстві 32
2.1.1 Такт виробництва 32
2.1.2 Норма балансу 32
2.1.3 Норма втрати балансу 33
2.2 Основні положення гібридного цеху 33
2.2.1 Розрахунок виробничої потужності на одиницю площі виробничої лінії 35

2.3 Висновки до розділу математичної моделі гібридного цеху 36
3 Опис та моделювання виробничої ділянки 37
3.1 Загальні положення практичної частини виробничої ділянки 37
3.2 Принцип роботи виробничої лінії сортування 40
3.3 Висновки до розділу опису та моделювання виробничої ділянки 44
4 Експериментальне дослідження панелі слідкування за процесом виробничої лінії 45
4.1 Приклад роботи виробничої лінії на базі IIoT 45
4.2 Загальні положення охорони праці 49
4.3 Висновки до розділу експериментального дослідження панелі слідкування за процесом виробничої лінії 51
Висновки 53
Перелік джерел посилання 56
Додаток А Лістинг програми симуляції 58
Додаток Б Апробація наукових результатів 58
Додаток В Демонстраційний матеріал 74

ВСТУП

Прямо зараз Industrial Internet of Things (IIoT) представляє особливий інтерес для виробничої, промислової та транспортної галузей. Проекти IIoT можуть надати виробникам краще уявлення про те, як працюють їх виробничі лінії, та зробити точніші прогнози стосовно того, коли конкретним машинам буде потрібне обслуговування, що скоротить непередбачувані простої.

Промислові підприємства можуть використовувати IIoT, щоб скоротити видатки на відправку персоналу для перевірки віддаленого обладнання, зробивши його самоконтрольованим. Роздрібні торговці можуть зрозуміти, дев їх ланцюжку постачання знаходяться "вузькі місця", а транспортні компанії можуть краще зрозуміти продуктивність власного автопарку. Але це не єдині зацікавлені сектори: охорона здоров'я та уряд також, ймовірно, стануть яскравими прибічниками IIoT. Хоча зараз він в основному досліджується великими організаціями, але згодом може отримати більш широке розповсюдження зі зниженням цін на обладнання та послуги.

Промисловий Інтернет Речей чи IIoT, працює з мільярдами промислових пристроїв – від машин на заводі до двигунів в літаках – які заповнені датчиками, підключені до бездротових мереж, а також збирають та обмінюються даними. Поява мініатюрних недорогих датчиків та широкосмугових бездротових мереж тепер означає, щонавіть найменші пристрої можуть бути підключені до мережі, враховуючи рівень цифрового інтелекту, який дозволяє відстежувати та контролювати їх, а також обмінюватись даними про їх стан та спілкуватись із іншими пристроями. Всі ці дані можуть збиратись та аналізуватись для підвищення ефективності бізнес-процесів.

Жодна галузь виробництва не може обійтися без промислового устаткування. Воно активно використовується в процесі виробництва продукції в різних видах промисловості, починаючи з харчової та легкої, аж до нафтогазової, дорожньо-будівельної, енергетичної та космічної. Сучасне

обладнання збільшує продуктивність та знижує роль ручної праці. Тим самим зберігає людські ресурси, зменшує роль людського фактора і підвищує якість продукції, що випускається.

Розробка методів керування промисловими пристроями за допомогою технології IIoT є актуальним завданням в сучасній індустрії. Інтеграція IIoT вирішує багато проблем та відкриває нові можливості для оптимізації виробничих процесів та підвищення ефективності виробництва.

Мета дослідження – удосконалення методу керування промисловими пристроями з використанням сучасних технологій Інтернету речей.

Об’єкт дослідження – промислові пристрої та обладнання, які використовуються в різних галузях промисловості.

Предмет дослідження – методи автоматизації промислового обладнання на базі IIoT.

Робота виконана згідно з ДСТУ [1, 2].

1 СУЧАСНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

1.1 Застосування промислового інтернету речей

1.1.1 Аналіз категорій промислового обладнання

На будь-якому підприємстві задіяно кілька категорій промислового обладнання:

– виробниче-машинне знаряддя або обробні верстати.

– підйомно-транспортне;

– машини-двигуни;

– технологічне;

– допоміжне.

У категорію виробничого обладнання входять усі машини, верстати та механізми, задіяні безпосередньо у технологічному процесі. Вони виконують операції, після яких змінюється якість, форма, конфігурація або стан сировини та заготовок.

1.1.2 Що таке промислове обладнання

Двигуни або енергетичне обладнання забезпечує доступ до якісної енергії та пристрої, що приводять у дію системи та механізми. Вони перетворюють механічну енергію в електричну та у зворотному порядку – електричну, пневматичну, гідравлічну або інший вид енергії на механічну. До них відносяться електроустановки, генератори та електричні станції, компресорні установки, бойлерні, насоси, парові машини, обладнання для котелень, газопоршневі електростанції.

Підйомно-транспортні пристрої – призначені для переміщення вантажів та людей як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках. Їх використовують для механізації трудомістких процесів навантаження,

розвантаження та транспортування як загальнозаводський внутрішньо- та міжцеховий транспорт. Це крани, маніпулятори, навантажувачі, автокрани, штабелери та інші машини.

Технологічне обладнання відрізняється максимальною автоматизацією. Його використовують у текстильній, харчовій, хімічній, нафтопереробній та інших галузях. Сюди в тому числі відносять технологічні лінії та роботів-маніпуляторів.

Допоміжне обладнання безпосередньо не бере участі у процесі виробництва. Його використовують у ремонтних, санітарно-технічних та допоміжних роботах [3].

1.1.3 Аналіз класифікації за різними параметрами

Виділяють і додаткову класифікацію обладнання за різними параметрами.

За способом впливу на заготівлі чи матеріали виділяють:

– хімічне, при використанні агресивних засобів;

– термічне передбачає використання низьких або високих температур;

– механічне, під впливом механічних зусиль.

Також виділяють класифікацію характером використання:

– універсальне, яке застосовується у різних галузях промисловості.

– спеціалізоване, яке використовується на конкретних виробництвах.

За умовами транспортування:

– габаритне, яке можна перевозити як звичайний вантаж;

– негабаритне, яке для перевезення необхідні дозволи та супровід;

– за конструктивними особливостями.

1.1.4 Аналіз інтелектуального виробництва «Smart manufacturing»

Інтелектуальне виробництво – це широка категорія виробництва, в якій використовується комп'ютерно-інтегроване виробництво, високий рівень адаптованості та швидкі зміни дизайну, цифрові інформаційні технології та гнучкіше навчання технічного персоналу. Інші цілі іноді включають швидку

зміну рівнів виробництва залежно від попиту, оптимізацію ланцюжка поставок, ефективне виробництво та можливість вторинної переробки. У цій концепції розумна фабрика має інтероперабельні системи, багатомасштабне динамічне моделювання та симуляцію, інтелектуальну автоматизацію, надійну кібербезпеку та мережні датчики.

Значення інтелектуальне виробництво охоплює безліч різноманітних технологій. Деякі з ключових технологій у русі інтелектуального виробництва включають можливості обробки великих даних, промислові пристрої та послуги для підключення до Інтернету, а також передову робототехніку. Зразка системи управління виробництвом, що демонструє взаємозв'язок аналізу даних, обчислень та автоматизації зображений на рисунку 1.1 [3].

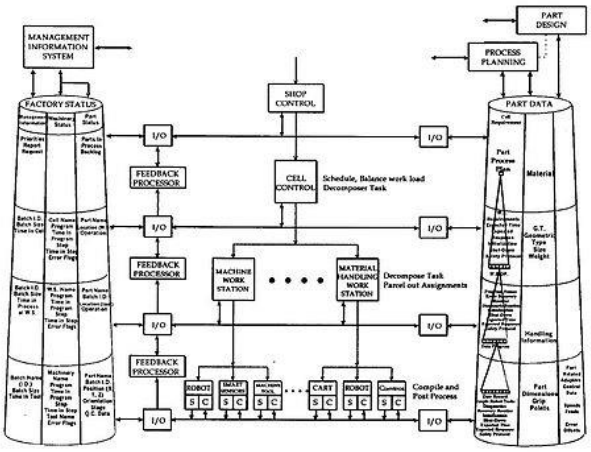


Рисунок 1.1 – Взаємозв'язок аналізу даних, обчислень та автоматизації [3]

1.1.5 Аналіз обробки великих даних

Інтелектуальне виробництво використовує аналітику великих даних для уточнення складних процесів та управління ланцюжками постачання. Під аналітикою великих даних розуміється метод збирання та розуміння великих наборів даних з точки зору того, що відомо як три V: швидкість, різноманітність та обсяг. Швидкість повідомляє частоту збору даних, яка може бути одночасною із застосуванням попередніх даних. Різноманітність описує різні типи даних, які можна обробляти. Обсяг є кількістю даних. Аналітика великих даних дозволяє

підприємству використовувати інтелектуальне виробництво для прогнозування попиту та необхідності зміни конструкції, а не реагувати на розміщені замовлення.

Деякі продукти мають вбудовані датчики, які виробляють великі обсяги даних, які можна використовувати для розуміння поведінки споживачів і поліпшення майбутніх версій продукту [4].

1.1.6 Аналіз просунутої робототехніки

Просунута промислові роботи, також відомі як інтелектуальні машини, працюють автономно і можуть безпосередньо зв'язуватися з виробничими системами. У деяких складних виробничих умовах вони можуть працювати з людьми для спільного збирання. Оцінюючи сенсорне введення та розрізняючи різні конфігурації продукту, ці машини можуть вирішувати проблеми та приймати рішення незалежно від людей. Ці роботи можуть виконувати роботу понад те, на що вони спочатку запрограмовані, і мають штучний інтелект, який дозволяє їм вчитися на власному досвіді. Ці машини можуть бути переконфігуровані та перенаправлені. Це дає їм можливість швидко реагувати на конструктивні зміни та інновації, що є конкурентною перевагою порівняно з традиційнішими виробничими процесами. Проблемою, пов'язаною з передовою робототехнікою, є безпека та благополуччя людей, які взаємодіють із роботизованими системами. Традиційно вживалися заходи щодо відокремлення роботів від людських ресурсів, але розвиток когнітивних здібностей відкрив такі можливості для спільної роботи роботів з людьми.

1.1.7 Аналіз промисловісті, пристроїв та послуг зв'язку

Використовуючи можливості Інтернету, виробники можуть збільшити інтеграцію та зберігання даних. Використання хмарного програмного забезпечення дозволяє компаніям отримувати доступ до обчислювальних ресурсів, що легко настроюються. Це дозволяє швидко створювати та випускати сервери, мережі та інші програми для зберігання даних.

Платформи корпоративної інтеграції дозволяють виробнику збирати широкомовні дані зі своїх машин, які можуть відслідковувати такі показники як робочий процес та історія машин. Відкрите спілкування між виробничими пристроями та мережами також може бути досягнуто через підключення до Інтернету. Це включає все, від планшетів до датчиків автоматизації машин, і дозволяє машинам коригувати свої процеси на основі вхідних даних із зовнішніх пристроїв.

1.1.8 Аналіз усунення неефективності на робочому місці

Інтелектуальне виробництво також можна віднести до дослідження неефективності робочого місця та допомоги у забезпеченні безпеки працівників. Оптимізація ефективності – це велика увага для прихильників розумних систем, що досягається шляхом дослідження даних та інтелектуальної автоматизації навчання. Наприклад, операторам можуть бути надані персональні карти доступу з вбудованим Wi-Fi та Bluetooth, які можуть підключатися до машин та хмарної платформи, щоб визначити, який оператор працює на якій машині в режимі реального часу. Інтелектуальна взаємопов'язана розумна система може бути створена для встановлення цільового показника продуктивності, визначення того, чи досяжна ця мета, та виявлення неефективності за допомогою невиконаних або відкладених цільових показників продуктивності. Як правило, автоматизація може знизити неефективність через людську помилку.

Безпеку працівників можна підвищити за рахунок безпечного, інноваційного дизайну та розширення інтегрованих мереж автоматизації. Це з тим, що технічні фахівці менше піддаються впливу небезпечних середовищ у міру розвитку автоматизації. У разі успіху менший нагляд з боку людини та інструктаж користувачів з автоматизації усунуть проблеми безпеки на робочому місці.

1.2 Індустрія 4.0

1.2.1 Основні положення Індустрії 4.0

Індустрія 4.0 - це проект високої технічної стратегії уряду Німеччини, яка сприяє комп'ютеризації традиційних галузей, таких як виробництво. Метою є інтелектуальна фабрика (Smart Factory), яка відрізняється адаптованістю, ефективністю використання ресурсів та ергономікою, а також інтеграцією клієнтів та ділових партнерів у бізнес-процеси та процеси створення цінності. Його технологічна основа складається з кіберфізичних систем та Інтернету речей.

Основний принцип роботи Індустрії 4.0 можна побачити на рисунку 1.2 [5].

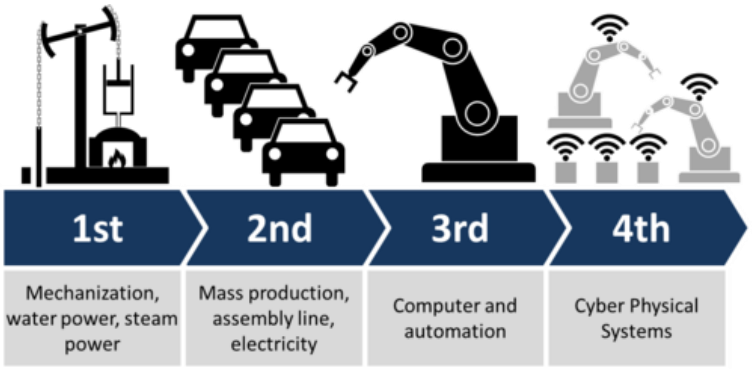


Рисунок 1.2 – Основний принцип роботи Індустрії 4.0 [5]

Цей вид «інтелектуального виробництва» широко використовує:

– бездротові з'єднання як під час складання продукту, так і при взаємодії з ним на великій відстані. їх;

– датчики останнього покоління, розподілені по ланцюжку поставок та однакові продукти (Інтернет речей);

– розробка великої кількості даних для контролю всіх етапів створення, розподілу та використання добре.

«Industrie 4.0» ілюструють кілька напрямків дій, які слід зробити. Ось деякі приклади:

– розширені виробничі процеси та швидке прототипування дозволять

кожному клієнту замовити єдиний у своєму роді продукт без значного збільшення витрат;

– платформи Collaborative Virtual Factory (VF) значно скоротитимуть витрати та час, пов'язані з розробкою нового продукту та розробкою продукції процесу, використовуючи повне моделювання та віртуальне тестування протягом усього життєвого циклу продукту;

– пристрої з розширеною людино-машинною взаємодією (HMI) та доповненою реальністю (AR) допоможуть підвищити безпеку на виробничих підприємствах та скорочення фізичного попиту на працівників (вік яких має тенденцію до збільшення);

– машинне навчання матиме фундаментальне значення для оптимізації виробничих процесів, як скорочення часу виконання замовлення, так зниження споживання енергії;

– кіберфізичні системи та міжмашинний зв'язок (M2M) дозволить збирати та обмінюватися даними в реальному часі з цеху, щоб скоротити час простою та простою за рахунок проведення надзвичайно ефективного профілактичного обслуговування.

1.2.2 Кіберфізичні системи в розумному виробництві

Кіберфізичні системи, будучи одним із основних елементів Індустрії 4.0, відіграють важливу роль у майбутньому інтелектуальних виробничих систем.

Першою системою можна виділити «Рівень з'єднання». Системи, коментарі, машини та люди є важливими частинами виробничих систем, і їх внесок значною мірою залежить від їхнього зв'язку з іншими виробничими елементами. Наприклад, оператору може знадобитися розширений інтелект виробничої системи, щоб приймати найефективніші рішення під час планування технічного обслуговування чи виробничих замовлень. Передові комунікаційні технології, такі як технологія 5G, значно покращать можливості підключення у виробничих системах.

Другою системою йде «Cyber Layer». Цей рівень є центральним вузлом для

зберігання даних, де використовуються інструменти аналізу великих даних для більш правильного та ефективного прийняття рішень. Цифровий двійник може бути реалізований на цьому рівні шляхом інтеграції кіберпростору з його фізичними компонентами. Більш того, методи, засновані на подібності, можуть використовуватися для однорангового порівняння між машинами та допомагають у покращенні діагностики несправностей та підвищення їх ефективності.

Третьою ми розглянемо «Рівень пізнання». На цьому рівні інфографіки використовуються для представлення користувачам результатів аналітичних досліджень. Прості радарні діаграми та тенденції деградації можуть використовуватись для простого уявлення про стан працездатності компонента. Тоді оператори легко ухвалять рішення на підставі поданих даних.

Четвертою буде «Рівень конфігурації». На цьому рівні рішення, прийняті на рівні Cognition, застосовуються до фізичної системи, щоб зробити системи самоналаштовуються, самоналаштовуються і стійкими.

Заключною системою виступає «Поверхневий монтаж». Поверхневий монтаж або технологія поверхневого монтажу (SMT) – це сукупність технологічних процесів монтажу електронних компонентів SMD на поверхню друкованих плат. Технологія включає три основні процеси. Нанесення паяльної пасти на контактні майданчики друкованих плат через металевий трафарет або за допомогою дозатора. Встановлення електронних компонентів, використовуючи спеціальні автоматичні машини з вакуумним захопленням електронних компонентів.

1.3 Фундаментальні ідеї «Industrial Internet of Things»

1.3.1 Основні положення «Industrial Internet of Things»

На першому етапі впровадження IIoT на промислове обладнання встановлюють датчики, виконавчі механізми, контролери та людино-машинні інтерфейси. В результаті стає можливим збір інформації, яка дозволяє

керівництву отримувати об'єктивні і точні дані про стан виробництва. Оброблені дані надаються всім підрозділам підприємства. Це допомагає налагодити взаємодію між співробітниками різних підрозділів і приймати обґрунтовані рішення.

Отримана інформація може бути використана для запобігання позаплановим простоям, поламкам устаткування, скороченню позапланового техобслуговування та збоям в управлінні ланцюжками поставок, тим самим дозволяючи підприємству функціонувати більш ефективно.

При обробці величезного масиву неструктурованих даних, що надходятьз датчиків, їх фільтрація і адекватна інтерпретація стає пріоритетним завданням. Тому особливого значення набуває представлення інформації в зрозумілому користувачеві вигляді. Для цього використовуються передові аналітичні платформи, призначені для збору, зберігання і аналізу даних про технологічні процеси і події, що відбуваються в реальному масштабі часу.

Промисловий Інтернет Речей дозволяє створювати виробництва, які виявляються більш ощадливими, гнучкими і ефективними, ніж існуючі. Бездротові пристрої з підтримкою протоколу IP, включаючи смартфони, планшети і датчики, вже активно використовуються на виробництві. Наявні дротові мережі датчиків в найближчі роки будуть розширені і доповнені бездротовими мережами, завдяки чому на підприємствах суттєво розширяться зони застосування систем моніторингу та управління. Наступний етап оптимізації виробничих процесів буде характеризуватися все більш щільною конвергенцією кращих інформаційних і операційних технологій.

По мірі становлення цифрових екосистем виробничі підприємства з ізольованих систем, які самостійно виконують всі необхідні для виробництва продукції виробничі та бізнес-процеси, будуть перетворюватися у відкриті системи, що поєднують різних учасників ринку; управляти засобами виробництва в цих системах буде не персонал, а хмарні сервіси, кінцева мета всіх цих трансформацій не випуск продукції, а надання послуг споживачеві.

1.3.2 Аналіз системи технічного зору

Система технічного зору – це система, що забезпечує виявлення, автоматичний контроль та аналіз об'єктів за їхніми зображеннями:

– в основному використовується в промисловості для контролю якості продукції в режимі;

реального часу для скорочення відходів та простоїв

– може точно та узгоджено виконувати складні та повторювані завдання на високій швидкості;

– може також використовуватися як вимірювальна система або система управління роботом для виконання таких дій, як підйом та переміщення об'єктів;

– усі системи технічного зору мають датчик зображення та програмне забезпечення контролю для обробки зображень та визначення вихідного сигналу системи.

Принцип роботи полягає в тому, що система технічного зору виявляє нерухомий або об'єкт, що рухається, захоплює зображення цього об'єкта, перевіряє певні властивості цього зображення, а потім передає результати різних етапів контролю.

Таким чином, різні етапи процесу візуального контролю включають:

– виявлення об'єкта та запуск захоплення зображення у відповідний момент;

– захоплення відповідного зображення об'єкта, проте потрібно належне освітлення, правильна фокусна відстань та спеціальні світлофільтри;

– виконання етапів контролю за захопленим зображенням, різні види контролю, такі як виявлення, підрахунок, вимірювання;

– надання результатів етапів контролю, де вихідний сигнал потім використовується іншим пристроєм для виконання відповідних дій. Базова архітектура системи технічного зору зображена на рисунку 1.3 [6].

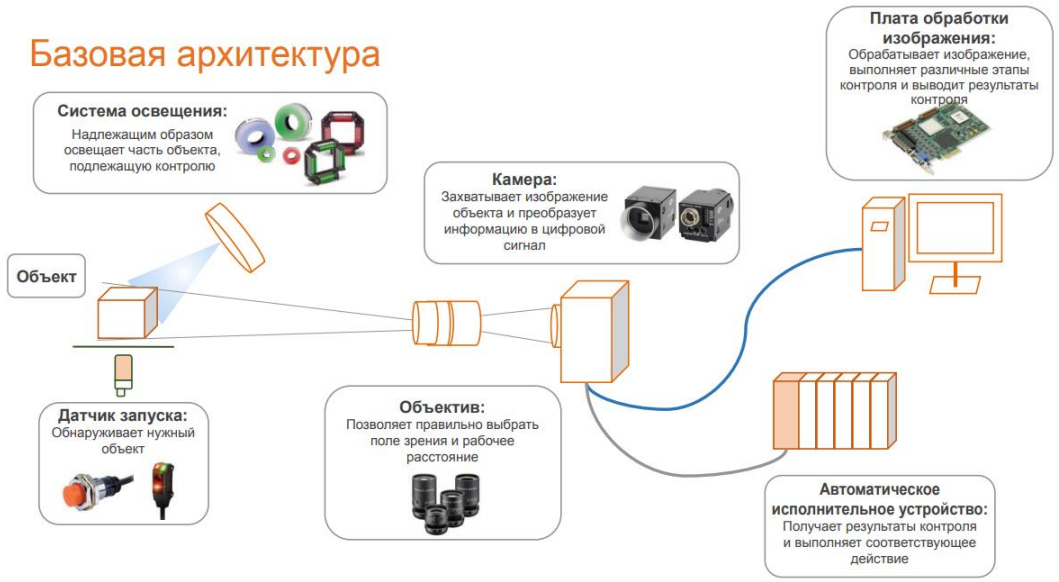


Рисунок 1.3 – Базова архітектура системи технічного зору [6]

1.3.3 Аналіз цифрових двійників

Цифровий двійник — це віртуальна модель, яка відтворює фізичну систему або процес, надаючи дані в реальному часі та відгуки про їх продуктивність. Цифрові близнюки дозволяють виробникам відстежувати та аналізувати поведінку фізичних активів у режимі реального часу, дозволяючи їм оптимізувати продуктивність, скоротити час простою та підвищити ефективність. Це віртуальне представлення, яке діє як цифровий аналог фізичної речі чи процесу в реальному часі.

Хоча сьогодні цифрові близнюки, безперечно, використовуються у виробництві, варіанти використання охоплюють багато галузевих вертикалей. За останні кілька років, коли світ став більш зв’язаним, дані стали доступнішими, багатшими та точнішими. Поширення обладнання Інтернету речей означає, що дані збираються з широкого спектру мережевих датчиків, створюючи детальну карту будь-якого активу підприємства або серії активів. Цифровий двійник створює віртуальне представлення процесу, системи, послуги, продукту чи іншої фізичної речі за допомогою віртуальної або доповненої реальності, 3D-графічного моделювання та моделювання даних. Фізичний світ віддзеркалюється в цій цифровій копії. Оновлення в режимі реального часу використовуються для збереження його точного дублікату. Завдяки численним

перевагам, включаючи усунення помилок і оптимізацію витрат у будь-якій системі, технологія цифрового близнюка (DT) вважається основою інтелектуального виробництва.

Перед цифровими двійниками можна поставити 3 головні задачі:

– потрібен ручний обмін даними між фізичним і цифровим об’єктами, тому зміни у фізичному об’єкті не відображаються в реальному часі;

– дані з фізичного об’єкта автоматично передаються в цифровий аналог, але не навпаки. Таким чином, зміни у фізичному об’єкті можна переглядати в цифровому вигляді, але не навпаки;

– бере участь двосторонній обмін даними між фізичними та цифровими об’єктами. Таким чином, зміни у фізичних або цифрових об’єктах впливають одна на одну.

Промисловість часто збирає великі обсяги необроблених даних з різних типів сенсорних мереж. Масивні різнорідні дані часто надсилаються в хмару, де очікується інформаційна панель. Це становить величезну проблему для очищення та однорідності необроблених даних, щоб зробити їх придатними для аналізу. Доступність даних часто сприймається промисловістю як належне, і очікується, що вона забезпечить прогностичну аналітичну модель у реальному часі з обсягом даних, який часто недостатньо використовується компаніями. Очікується, що використання поточних підходів машинного навчання (ML) стане привабливим рішенням для вирішення проблем безпеки виробництва через великі обсяги даних, обчислювальної потужності та великої ємності зберігання, які були розгорнуті на підприємствах завдяки підключенню розумних пристроїв і машин. Машинне навчання в поєднанні з аналізом даних у реальному часі набуває величезної популярності як основна підтримка для надання актуальної (або майже негайно) відповідної інформації та практичних ідей у стратегічному моніторингу.

Розділ машинного навчання штучного інтелекту спирається на те, що комп’ютери можуть виявляти закономірності в даних і приймати рішення без участі людини. Було проведено багато досліджень щодо того, як змусити

машини навчатися самостійно. Недавнє дослідження «Cadavid et al» представляє широкий вибір програм машинного навчання в Індустрії 4.0. Однак ці програми ML зазвичай зосереджуються на аспектах самого виробничого процесу, таких як планування та розклад, інтелектуальне технічне обслуговування, контроль якості тощо. Огляд безлічі типів ML показано нижче на рисунку 1.4 [7].

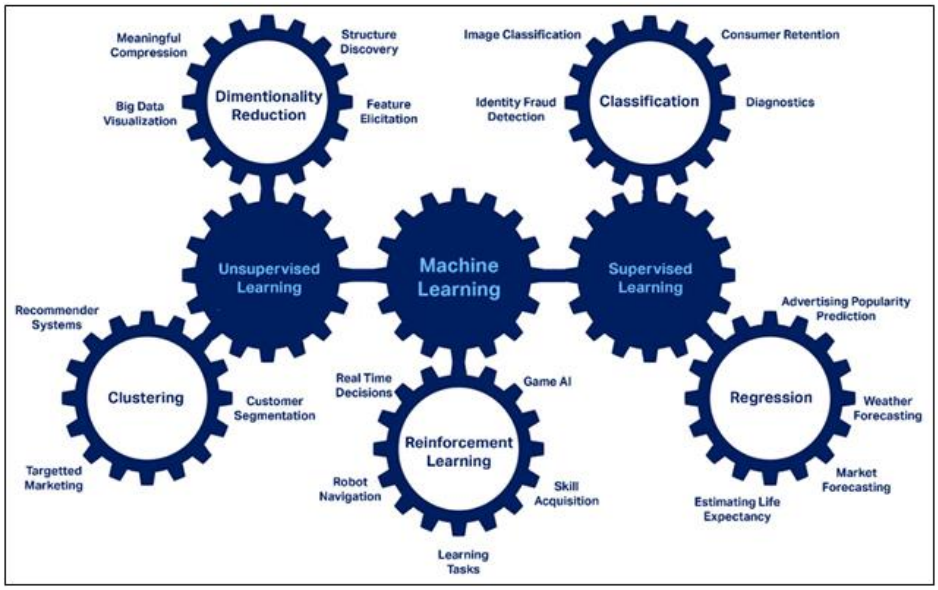


Рисунок 1.4 – Види машинного навчання [7]

1.4 Аналіз ділянки виробничої лінії

Створення динамічної екосистеми виробничої лінії дозволяє виробникам оптимізувати роботу та пропонує їм суттєву гнучкість. Виробництво має відповідати цілям компанії.

Розумна фабрика повинна містити ресурсну систему підприємства, яка функціонує як єдина інформаційна база даних. Оскільки великі дані підживлюють розумні фабрики, компанії повинні знайти спосіб аналізувати дані виробничої лінії, а також створити середовище для зберігання таких великих обсягів цінної інформації. Датчики, прикріплені до заводського обладнання, витягують дані, і стабільна система є життєво важливою для доступу до таких даних і їх застосування різними способами.

Додавання трансформаційних технологій у виробництво створює нову

інформаційну та комунікаційну екосистему інженерів, робітників, машин, заводських цехів, складальних ліній і кінцевого продукту. Кожен крок можна налаштувати для індивідуальних операційних потреб.

Планування та контроль виробництва (Production Planning and Control) використовує ієрархічні структури, які представляють різні елементи процесу PPC у різнорідних деталях і графіках. Ця ієрархія доповнює підхід «деталізації», якому віддають перевагу бізнес-менеджери під час прийняття рішень щодо своїх виробничих систем. Приклад планування та контролю виробництва можна побачити на рисунку 1.5 [8].

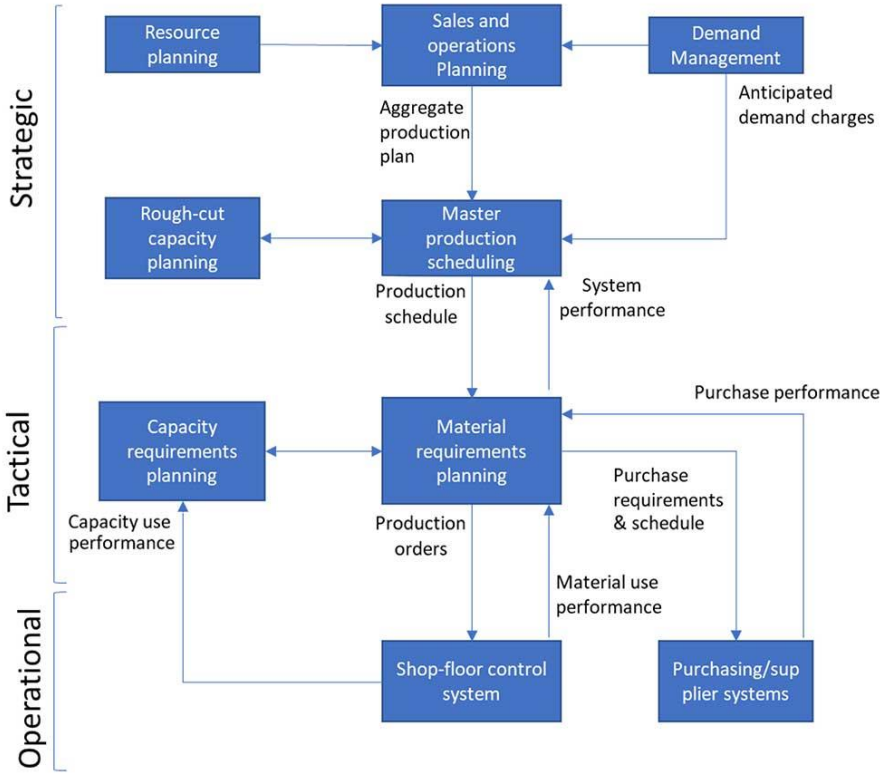


Рисунок 1.5 – Планування та контроль виробництва [8]

Ключове обмеження PPC стратегічного рівня полягає в тому, що воно беззастережно припускає, що зовнішні збої, такі як зміни промислової політики, коливання погоди та глобальні економічні коливання, середні з року в рік. Це часто змушує планувальників і операторів використовувати надлишкові потужності, безпечні запаси та буфери в структурі виробництва. Зведені дані,

крім того, мають різну якість залежно від важливості та кількості даних, які використовує компанія. Проблеми включають довгострокову якість даних (через коливання бізнес-середовища) і частоту оновлення, серед іншого. У таких випадках доступ до даних у реальному часі може не мати переваг, навіть якщо вони точні. Більший проміжок даних краще для включення різноманітних сценаріїв моделювання.

Традиційним корпоративним системам, таким як ERP, система Advanced Planning and Scheduling (APS) або Manufacturing Execution Systems (MES), важко задовольнити потреби PPC у часовій близькості або «реальному часі». Ці системи страждають від ще одного критичного обмеження: існує велика кількість відхилень між інформацією, що міститься в таких корпоративних системах, і реальністю цеху та ланцюга постачання. Проблема ускладнюється тим, що такі системи, як правило, налаштовані на зіставлення даних з обмеженого діапазону джерел виробничої системи. Такими джерелами зазвичай є виробничі лінії та випадкові складські запаси. Багато факторів впливають на продуктивність виробничих систем. Продуктивність PPC краща, коли дані надходять із різних джерел. Індустрія 4.0 може розплутати такі складнощі.

Індустрія 4.0 передбачає майбутнє виробництва, де наскрізні фази життєвого циклу продукту інтегровані, внутрішні функціональні одиниці та виробничі системи об’єднані в мережу (вертикальна інтеграція) і існує інтегрована зовнішня мережа створення вартості (горизонтальна інтеграція). Останні технологічні досягнення, зокрема Big Data Analytics (BDA), кіберфізичні системи, доповнена реальність, Інтернет речей (IoT), машинне навчання (ML), адитивне виробництво, а також хмарні та периферійні обчислення сприяли таким проривам. Дані, отримані з таких внутрішньозаводських інтегрованих систем, дозволять у режимі реального часу контролювати фабрику та приєднаний до неї ланцюг поставок.

Важливим висновком Індустрії 4.0 є автономні та розумні виробничі системи. Системні відходи зведені до мінімуму, оскільки контроль заводу в режимі реального часу дозволяє виготовляти продукцію відповідно до вимог

замовника. Ще однією помітною перевагою є здатність технологій і інструментів ML і BDA керувати великою різноманітністю даних.

Оскільки компанії крокують до Індустрії 4.0, щоб оцифрувати свої виробничі операції, прогрес досягається поетапно. Такими етапами є комп'ютеризація, адаптивність, зв'язок, передбачувана здатність, видимість і прозорість. Для спрощення ці шість етапів перекласифіковано на три, такі як підключений, інтелектуальний і прозорий. Ці три етапи, як показано на рис. 1.6, пов'язані з менеджерами виробничих систем, які хочуть отримати кращі інструменти, щоб точно та швидко реагувати на зміни бізнес-середовища [8].

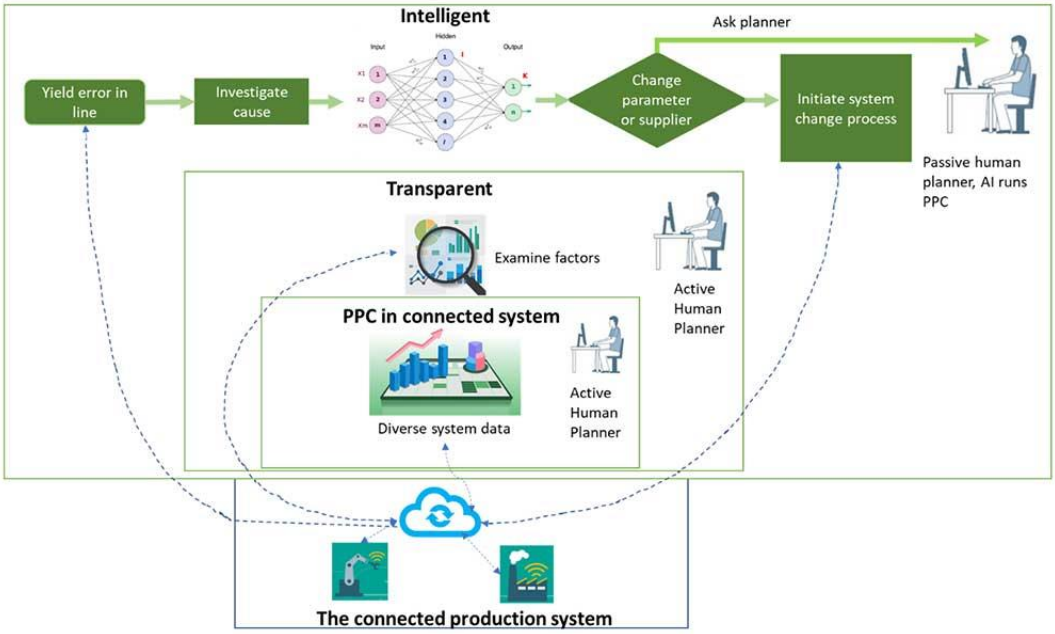


Рисунок 1.6 – Планування та контроль виробництва Індустрії 4.0 [8]

Сучасні виробничі процеси, як правило, мають більшу кількість електронних компонентів, а також програмованих логічних контролерів (PLC), що забезпечує більшу автоматизацію виробничого процесу. Приклад програмованого логічного контролера Siemens S7-1200 можна побачити на рисунку 1.7 [8].

Рисунок 1.7 – Програмований логічний контролер Siemens S7-1200 [8]

Одним із головних аспектів Siemens S7-1200 є його продуктивність. Цей контролер здатен обробляти різноманітні завдання управління та автоматизації, забезпечуючи стабільну і ефективну роботу виробничих систем.

Siemens S7-1200 підтримує різні протоколи зв'язку, що спрощує інтеграцію з іншими пристроями та системами в промисловому середовищі. Це дозволяє контролеру взаємодіяти з іншими компонентами системи та обмінюватися даними в режимі реального часу.

Зондування досягається за допомогою датчиків збору телеметричних даних і технологій автоматичної ідентифікації, таких як IoT, радіочастотна ідентифікація (RFID), приклад якої можно побачити на рисунку 1.8 і маяки. Крім того, завдяки новому протоколу Інтернету версії 6 (IPv6), який є новим стандартом, який теоретично дозволяє використовувати до масивних інтернет-адрес (3,4*10E38), тепер можна приєднувати речі, які раніше були занадто дорогими або складними для підключення до Інтернету. Тепер усе можна з’єднати, виміряти, простежити, відстежувати та покращувати. Згенеровані дані, отримані в результаті руху або дії речей, можна використовувати для покращення дизайну системи, а також для планування та керування операціями. Відстеження та відстеження ресурсів на заводі та в ланцюжку постачання стає

набагато легшим [8].

Рисунок 1.8 – Радіочастотна ідентифікація (RFID) [8]

Датчики IoT через крайові пристрої IoT взаємодіють із фізичними виробничими системами шляхом передачі запитів на обчислення, статус і місцезнаходження, а також шляхом отримання інструкцій і даних від служб хмарної інфраструктури. Необхідність миттєвої реакції змушує використовувати пристрої IoT Edge. Це особливо актуально, коли існує затримка передавання даних із пристрою в хмару, яка перевищує прийнятну, і пропускна здатність стає проблемою. Таким чином, тепер можна планувати та контролювати виробничі системи та ланцюги поставок у режимі реального часу. Один з гарних варіантів даного типу датчиків на виробничій лінії є Nordic Semiconductor nRF6943, який можна побачити на рисунку 1.9 [8].

Рисунок 1.9 – Nordic Semiconductor nRF6943 [8]

Конвеєр на продуктовій лінії є системою, в якій пристрої та обладнання на лінії конвеєра підключені до інтернету та обмінюються даними для оптимізації виробничих процесів.

На конвеєрі встановлюються різні сенсори, такі як датчики температури, вологості, тиску, а також камери та RFID-мітки, які збирають інформацію про продукти, що проходять стрічкою. Ці дані передаються до системи IIoT.

Дані, зібрані з конвеєра, аналізуються з використанням спеціалізованих програмних систем, які можуть виявляти аномалії, покращувати ефективність виробництва та забезпечувати контроль якості продукції.

Системи IIoT дозволяють операторам моніторити та керувати конвеєром з будь-якої точки світу через інтернет. Це спрощує процес управління та дозволяє оперативно реагувати на неполадки. Аналіз даних дозволяє виявляти ознаки можливих збоїв та попереджати про їх можливе виникнення. Це знижує ризик простоїв на виробництві та економить ресурси. IIoT допомагає оптимізувати витрати матеріалів, енергії та робочого часу. Автоматичне регулювання швидкості конвеєра в реальному часі та налаштування параметрів виробництва з урахуванням умов, що змінюються, може підвищити продуктивність.

Завдяки RFID та візуальним системам, можна відстежувати переміщення продукції на конвеєрі та контролювати якість кожної одиниці продукції.

IIoT також сприяє покращенню безпеки на виробництві шляхом моніторингу умов на конвеєрі та реагування на аварійні ситуації.

Використання IIoT може знизити витрати на виробництво, зменшити кількість шлюбу та знизити енергоспоживання. Дані з конвеєра можуть зберігатися та аналізуватись у хмарних платформах, що полегшує їх доступність та забезпечує масштабованість. Приклад конвеєра можна побачити на рис. 1.10 [9].

Рисунок 1.10 – Конвеєр на виробничій лінії [9]

1.5 Висновки до аналізу літератури

Ми провели аналіз промислового Інтернету речей та індустрії 4.0. Розглянули основні поняття цього напряму, зосереджуючись на промисловому обладнанні. Визначили п'ять основних категорій промислового обладнання, такі як виробниче, підйомно-транспортне, машини-двигуні, технологічне та допоміжне. Також розглянули основні сфери застосування цього обладнання та дослідили поняття "Smart manufacturing", де проаналізували взаємозв'язок цього підходу з автоматизацією. Провели аналіз зберігання та обміну великими даними на промисловому підприємстві, зосереджуючись на виробничій лінії.

Аналіз виробничої лінії включав в себе опис планування та контролю виробництва, а також врахування аспектів Індустрії 4.0. Розглянули можливості повної автоматизації виробничої лінії та навели приклади використання логічного контролера та RFID для ідентифікації продукції.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГІБРИДНОГО ЦЕХУ

2.1 Розрахунки норм на підприємстві

Загальні параметри оцінки переваг і недоліків схеми проектування виробничої лінії включають такт виробництва, вартість, рівень балансу та рівень втрати балансу.

2.1.1 Такт виробництва

Такт-час означає середній час, необхідний для складання продукту, який визначається продуктивністю складальної лінії. Формула розрахунку така, як показано в рівнянні (2.1), де *CT* — такт виробництва, *T* — ефективний робочий час, а *Q* — вихід продукту протягом ефективного робочого часу.

$$CT = \frac{T}{Q}. \tag{2.1}$$

2.1.2 Норма балансу

Швидкість збалансованості виробничої лінії, також відома як синхронізація процесу, є середнім показником усіх виробничих і виробничих процесів. Зменште простої або блокування, викликані дисбалансом процесів, регулюючи робоче навантаження. Формула для розрахунку норми балансу виробничої лінії наведена у рівнянні (2.2), де *BR* — норма балансу, *Ts* — сума стандартних робочих годин кожного процесу, *Tb* — час вузького місця після балансу, а *n* — число процесів.

$$BR = \frac{T_S}{nT_b} \times 100\%. \tag{2.2}$$

2.1.3 Норма втрати балансу

Коефіцієнт втрати балансу стосується втрати виробництва виробничої лінії, спричиненої дисбалансом виробничої лінії. Він розраховується за рівнянням 2.3, де *LR* – швидкість втрати балансу, а *BR* – норма балансу.

$$LR = 1 - BR\,. \tag{2.3}$$

На основі правил роботи цеху встановлюється обладнання складальної лінії та обслуговуючий персонал. Формула для річного робочого часу обладнання *T* наведена у рівнянні 2.4, де *h* є ефективними робочими годинами на рік.

$$T = h \times 3600 \times r\,. \tag{2.4}$$

Фактичний ефективний робочий час *t* обладнання розраховується за рівнянням 2.5, де *c* — робочі години станції, *k* — потреба у виробничих потужностях, а *f* — швидкість пропуску продукції.

$$t = \frac{ck}{f}\,. \tag{2.5}$$

Кількість обладнання *N* обчислюється за рівнянням 2.6.

$$N = \frac{t}{T}\,. \tag{2.6}$$

2.2 Основні положення гібридного цеху

Цех гібридного складання відноситься до типу складальної лінії, включаючи складальні лінії «plug and play» і лінії складання одиниць. Оскільки схеми конфігурації, що відповідають завданням цехового виробництва, не є

унікальними, необхідно розробити відповідну схему відповідно до фактичних вимог виробника. Виходячи з вартості будівництва та виробничої потужності на одиницю площі складальної лінії цеху, у цьому документі розроблено кількість конфігурацій двох типів складальних ліній у гібридній майстерні.

Кожна складальна лінія буде розміщена горизонтально, щоб зменшити вартість відходів і втрати потужності складальної лінії, спричинені факторами логістики, враховуючи взаємозв'язок між виробничою зоною та зоною виробництва готової продукції. Схему гібридної складальної лінії можна побачити на рисунку 2.1 [10].

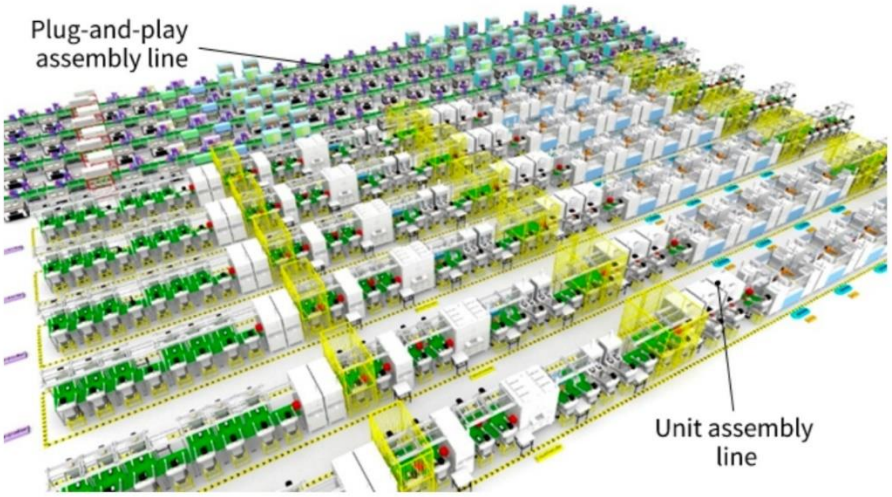


Рисунок 2.1 - Схема гібридної складальної лінії [10]

Відповідно до параметрів двох типів складальних ліній, у цьому документі всебічно розглядається вартість будівництва та коефіцієнт використання площі цеху для виробничої лінії цеху, встановлюється модель оптимізації дизайну цеху гібридних виробничих ліній та розраховується кількість підключай і грати на складальних лініях і лініях складання одиниць.

2.2.1 Розрахунок вартості будівництва виробничої лінії

Вартість будівництва конвеєра цеху — це сума всіх видів витрат на будівництво конвеєра в цеху. Таким чином, ми можемо визначити рівняння (2.7), де *CC* — вартість будівництва цехової конвеєрної лінії, *DCi* — вартість

придбання обладнання і-го виду складальної лінії, *HCi* — вартість заробітної плати робітників на конвеєрній лінії, *Ni* – кількість конвеєрів і-го виду, а n – кількість типів конвеєрів у цеху.

$$CC = \sum_{i=1}^{n}(DC_i + HC_i)N_i \tag{2.7}$$

2.2.2 Розрахунок виробничої потужності на одиницю площі виробничої лінії

Раціональне використання площі ділянки та наукова організація виробничої лінії можуть задовольнити виробничі потреби та зменшити площу виробничої лінії для максимізації виробничої потужності на одиницю площі складальної лінії. Він може звільнити більше логістичних каналів, складських приміщень та інших приміщень для майстерні, щоб покращити пластичність майстерні. Як показано в рівнянні (2.8), де *UR* — виробнича потужність складальної лінії на одиницю площі, *Si* — площа підлоги складальної лінії і-го типу, *PCi* — виробнича потужність складальної лінії і-го типу та S' — додаткова площа, необхідна для наукового планування виробничої лінії.

$$UR = \frac{\sum_{i=1}^{n} PC_i N_i}{S` + \sum_{i=1}^{n} S_i N_i} \tag{2.8}$$

Визначити різні значення ваги для цільової функції та перетворити її в єдину цільову функцію, тоді цільову функцію для кількісного проектування гібридних складальних ліній можна визначити як рівняння (2.9).

$$\min F = u_1 CC + u_2(-UR) = u_1 \sum_{i=1}^{n}(DC_i + HC_i)N_i - u_2 \frac{\sum_{i=1}^{n} PC_i N_i}{S` + \sum_{i=1}^{n} S_i N_i} \tag{2.9}$$

Кількість різноманітних виробничих ліній у цеху має бути розроблено з урахуванням конкретних вимог клієнтів щодо виробничих потужностей. Його

можна виразити у вигляді рівняння (2.10), де PC_T є цільовою виробничою потужністю цеху.

$$\sum_{i=1}^{n} PC_i N_i \geq PC_T \tag{2.10}$$

З точки зору роботи майстерні, необхідно гарантувати безпеку майстерні та поводження з матеріалами, тому між складальними лініями має бути щонайменше 2 м шириною каналу. Оскільки складальні лінії в гібридному цеху мають лінійну схему, ми можемо визначити рівняння (2.11), де *N* — кількість складальних ліній, *W0* — ширина виробничої зони цеху, *Wi* — ширина і-го виду складальних ліній і *w* - ширина каналу інтервалу складальних ліній.

$$N = \sum_{i=1}^{n} N_i \leq \frac{W_0 + 2 - \sum_{i=1}^{n} W_i}{\omega} \tag{2.11}$$

2.3 Висновки до розділу математичної моделі гібридного цеху

В даному розділі була розглянута математична модель гібридного цеху. Розраховані норми на підприємстві, такі як такт виробництва, норма балансу та норма втрати балансу, включаючи тактовий час виробництва. Описано основні положення гібридного цеху та оптимізовано розміщення складальних ліній. Розроблено модель оптимізації дизайну гібридного цеху, включаючи вартість будівництва та виробничу потужність на одиницю площі виробничої лінії. Для розрахунку вартості будівництва цехової конвеєрної лінії та виробничої потужності на одиницю площі складальної лінії були визначені відповідні рівняння.

Викладено цільову функцію для мінімізації вартості будівництва та максимізації виробничої потужності на одиницю площі. Уведено умову для цільової виробничої потужності цеху та безпечного розташування складальних ліній.

3 ОПИС ТА МОДЕЛЮВАННЯ ВИРОБНИЧОЇ ДІЛЯНКИ

3.1 Загальні положення практичної частини виробничої ділянки

У цьому розділі ми розглянемо, як можна інтерпретувати метод управління промисловими пристроями за допомогою технології IIoT, виділимо найголовніші аспекти даного методу та розглянемо їх на прикладі використання. Для симуляції моделі використовуємо таку програму, як «CoppeliaSim», раніше відома як «V-REP», яка є симулятором робота, що використовується в промисловості, освіті та дослідженнях. Для нашої роботи використовуємо версію «CoppeliaSim Pro», за допомогою якої самостійно зможеш задавати логіку роботи нашої промислової ділянки. Також ми будемо використовувати функціонал, який заздалегідь прописаний для певних вибраних пристроїв. «CoppeliaSim» дозволяє нам моделювати будь-яку логіку дій механічних приладів, а також показати принцип роботи конкретної деталі в дії за допомогою функціоналу, як створення сценарію. Створюючи сценарій ми можемо продемонструвати реальну роботу будь-якої змодельованої нами ділянки підприємства, а також наочно показати, який функціонал виконуватиме кожна частина процесу.

Для того, щоб почати роботу в даній програмі, першим кроком після встановлення ми відразу побачимо бічну панель «Model Browser», де ми зможемо знайти всі готові 3D моделі, що заздалегідь надані нам. Також за бажанням можна самостійно створювати моделі та використовувати їх у «Coppeliasim». Приклад використання можна побачити рисунку 3.1.

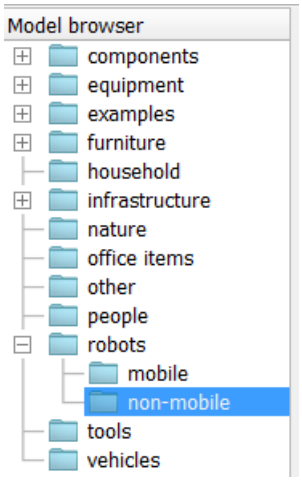


Рисунок 3.1 – Бічна панель «Model Browser» [11]

Щоб побачити обрану модель, необхідно перемістити її у середу моделювання. Якщо всі дії були виконані правильно, то можна буде побачити обрану модель, як це зображено на рисунку 3.2.

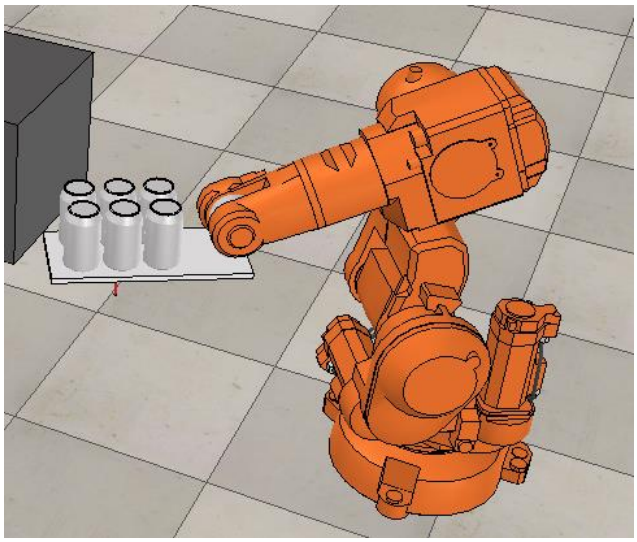


Рисунок 3.2 – Доданий об’єкт у середовище моделювання [11]

Для того, щоб об'єднати елементи, нам необхідно скористатися панеллю «Scene Hierachy». Для того, щоб у майбутньому ми мали можливість взаємодії моделей між собою. Також для об'єднання кількох елементів ми можемо натиснувши за необхідною нам моделлю вибрати відповідний пункт для об'єднання з останнім вибраним елементом. Приклад панелі «Scene Hierachy» можна побачити рисунку 3.3.

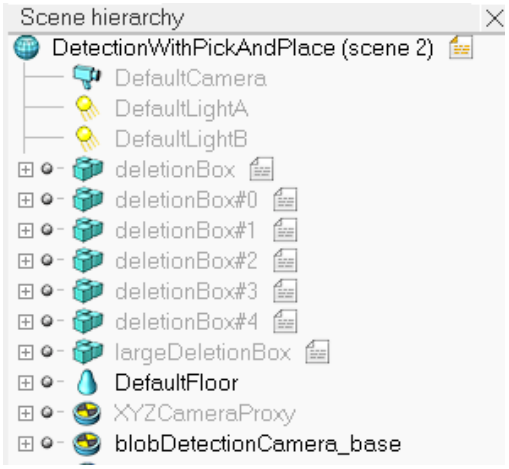


Рисунок 3.3 – Бічна панель «Scene Hierachy» [11]

Найголовніше для злагодженої й точної роботи наших моделей, нам необхідно використовувати такий функціонал даної програми під назвою «Proximitly sensor», щоб роботи, наприклад маніпулятори, могли стежити за тим, як деталі з конвеєра потрапляють в діапазон зони дії їх тригера. Для того, щоб додати цю можливість, нам необхідно у верхній панелі вибрати пункт «Add» та обрати «Proximitly sensor». Який саме сенсор необхідний залежить від поставленого завдання. Результат додавання «Proximitly sensor» можна побачити рисунку 3.4.

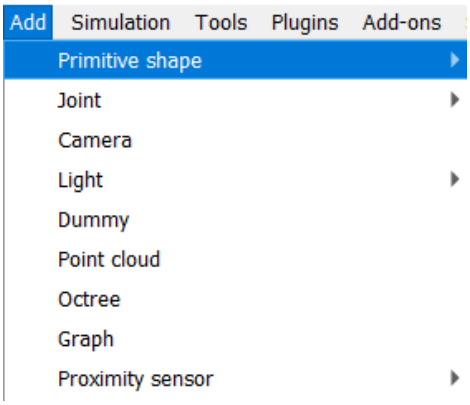


Рисунок 3.4 – Приклад додавання «Proximitly sensor» [11]

3.2 Принцип роботи виробничої лінії сортування

У рамках нашої роботи ми розглянемо реалізацію виробничої лінії, яка базується на роботі з сортуванням матеріалів, відділенні бракованих елементів, що надходять з конвеєрної лінії, від придатних у використанні, а також подивимося на роботу роботів-маніпуляторів у даній галузі. Розберемо, які механічні прилади були задіяні і яку роль вони відіграють на цій ділянці виробництва.

Першим кроком нам потрібно визначитися, як виглядатиме наша виробнича лінія. Головним елементом цієї ділянки є конвеєр, який здійснює подачу елементів, які потраплятимуть під сортування. Даний варіант підходить для стабілізованої роботи та уникнення можливих відхилень від встановленої програми завдання. Варіант такого конвеєра можна побачити рисунку 3.5.

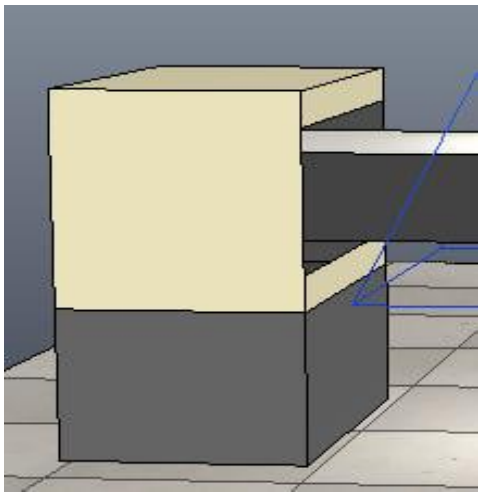


Рисунок 3.5 – Модель конвеєра на ділянці виробництва [11]

Наступним кроком нам необхідно вибрати варіант того, як ми стежитимемо за матеріалами, які потраплятимуть на конвеєрну лінію і як нам передати інформацію роботам-маніпуляторам, що до них надходить продукт. Одним з варіантів розв'язання цього питання виступає камера, яка реєструє всі деталі, що знаходяться в діапазоні її видимості, щоб передати отриману інформацію. Для реалізації цього варіанту камера буде встановлена відразу після

появи продукту з конвеєра, щоб уникнути затримки та доставлення отриманих даних значно заздалегідь. Одну з таких камер можна побачити рисунку 3.6.

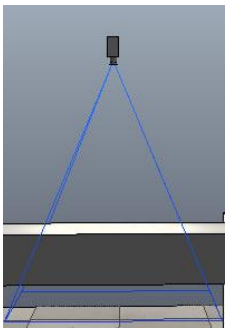


Рисунок 3.6 – Модель камери виявлення [11]

Якщо в діапазоні нашої камери з'явиться будь-яка деталь, ми зможемо її побачити з місця спостереження за нею. Також у разі дефекту деталі вона буде проігнорована роботами-маніпуляторами, але з певною ймовірністю вона може бути пропущена і буде відправлена до спеціальної секції. Приклад з виду камери можна побачити рисунку 3.7.

Рисунок 3.7 – Приклад відображення камери під час знаходження деталей в діапазоні її зору [11]

Роботи-маніпулятори необхідні нам для того, щоб самостійно доставляти необхідну деталь у відповідну для неї секцію у спеціально відведеному місці відділу сортування, яку можна побачити на рисунку 3.8.

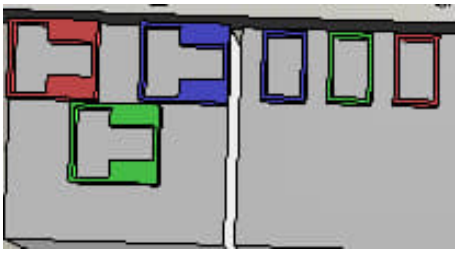


Рисунок 3.8 – Сортувальні секції [11]

Після того, як деталь потрапляє у свою секцію, вона вирушає на свій відведений для неї конвеєр і потрапить до загального складу, де вона буде впорядковано зберігатися і чекатиме подальших з нею дій. Дані конвеєри можна побачити на рисунку 3.9.

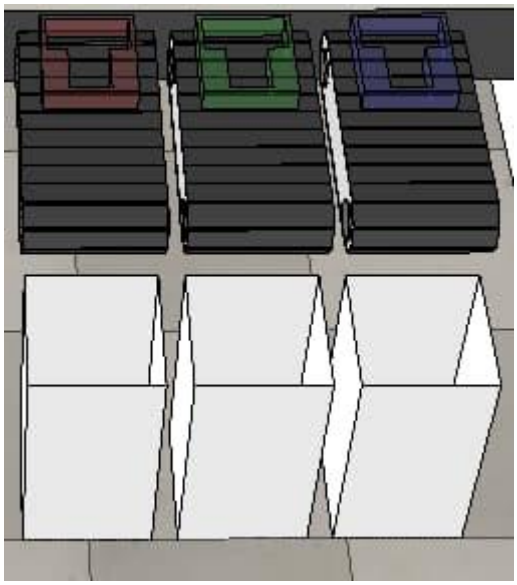


Рисунок 3.9 – Конвеєрні лінії для сортування деталей за формою [11]

Головним об'єктом у нашій виробничій лінії є робот-маніпулятор, який обробляють інформацію, отриману з камер фіксації деталей та за допомогою отриманої інформації взаємодіє з деталями на конвеєрі, переміщуючи їх, ігноруючи браковані деталі та сортуючи за необхідними відсіками, тим самим відправляючи їх на окремі конвеєрні лінії. В рамках нашої роботи ми вирішили обрати такий маніпулятор, як «IRB 360 FlexPicker». Завдяки видатній гнучкості в плані маневреності та здатності адаптуватися до різних завдань, «IRB 360 FlexPicker» ефективно справляється з високими вимогами до швидкості та

точності виконання завдань, забезпечуючи швидке і точне переміщення предметів. Даного робота можна побачити на рисунку 3.10.

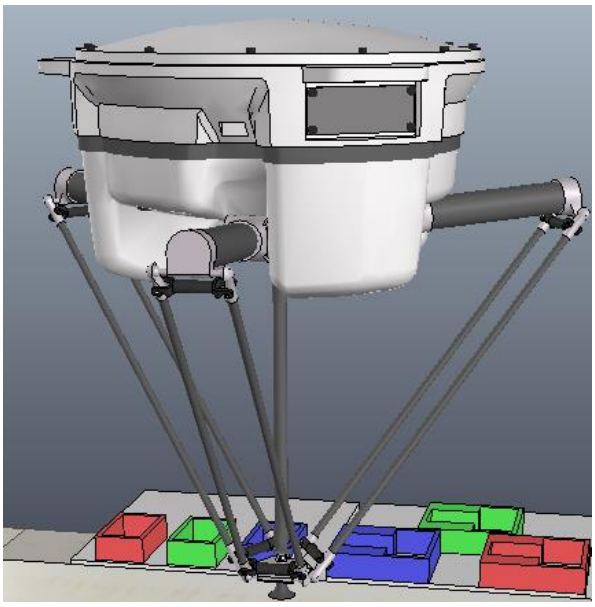


Рисунок 3.10 – Робот «IRB 360 FlexPicker» [11]

Зрештою ми отримаємо повноцінну виробничу лінію сортування деталей, яка подає деталі з конвеєра, де їх практично відразу фіксує камера у своїй області видимості та передає цю інформацію на «IRB 360 FlexPicker». Робот, обробивши отриману інформацію, вже знає, куди йому потрібно буде помістити деталь і перекладає її на спеціально відведений для неї конвеєр, де вона потрапить у загальний збір деталей даного виду. Проігноровані або браковані деталі потрапляють до спеціально відведених їм відсік. Результат повного складання виробничої лінії сортування можна побачити рисунку 3.11.

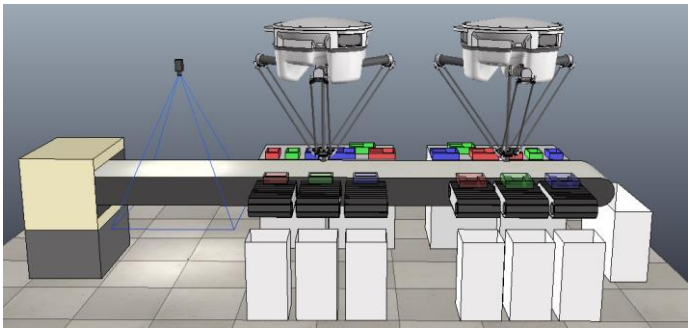


Рисунок 3.11 – Результат повної виробничої лінії сортування [11]

3.3 Висновки до розділу опису та моделювання виробничої ділянки

В даному розділі ми розібрали та зробили опис промислової ділянки, а також спроектували модель даної ділянки. Для розробки ми обрали середовище «CoppeliaSim», де розповіли про базовий функціонал роботи з даною програмою, показали основні вікна з якими відбувається взаємодія та розібрали, що необхідно знати для створення базової логіки та реалізації рухомих моделей.

Також ми детально розповіли за кожен компонент нашої промислової лінії,

яку роль вони відіграють в роботі сортування деталей та навели приклади підходящих об’єктів на виробництві. Продемонстрували результат у рухомому виді та взаємодії.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАНЕЛІ СЛІДКУВАННЯ ЗА ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЧОЇ ЛІНІЇ

4.1 Приклад роботи виробничої лінії на базі IIoT

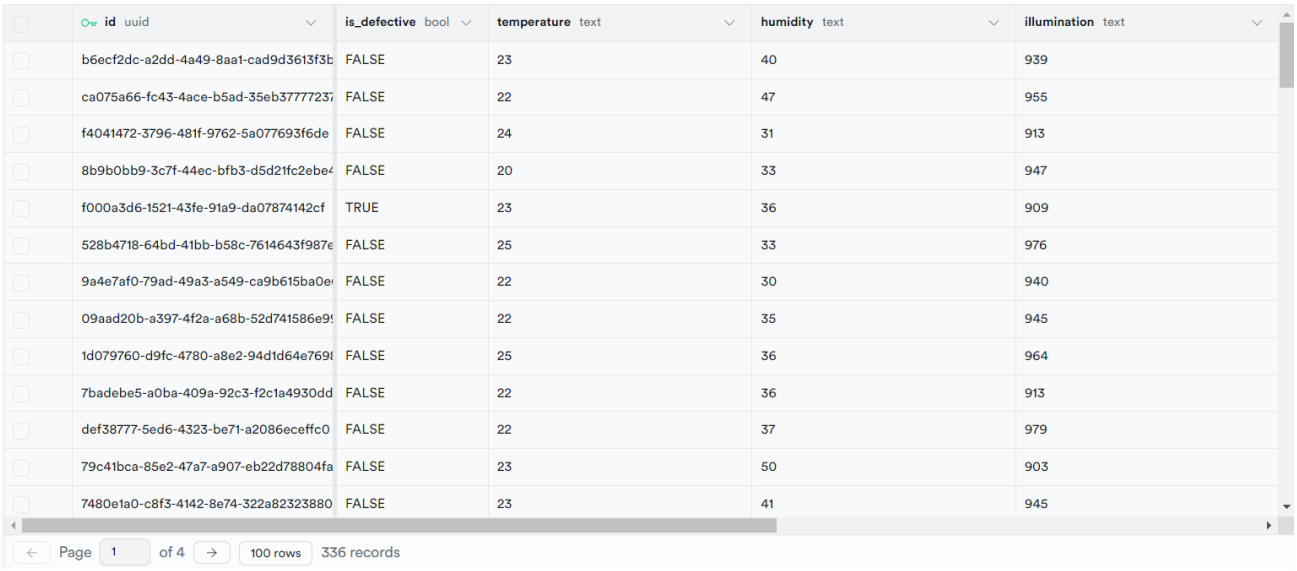
У попередньому розділі ми розглянули змодельовану версію виробничої лінії сортування деталей. Розглянули, яку роль виконує кожен елемент даного підприємства, як обмінюються інформацією роботи і розібрали сам принцип сортування на активному прикладі, а також описали основний принцип моделі і за яким принципом реалізована дана імплементація.

У цьому розділі ми розглянемо саме доставлення необхідної інформації та розглянемо приблизну реалізацію, візуалізуючи панель спостереження за процесом. Для того щоб продемонструвати роботу обміну інформацією, ми скористаємося мовою програмування, як «JavaScript», а також бібліотекою «React». Даний варіант мови був нами обраний завдяки своїй гнучкості та легкості у використанні, а також можливості використання сторонніх бібліотек, які допоможуть нам детальніше реалізувати поставлене нами завдання, наприклад графіків. Для того, щоб відобразити графіки, ми будемо користуватися такою бібліотекою під назвою «Recharts», яка допоможе нам детально показати отримані та оброблені дані у вигляді графіків і показувати зміни в реальному часі.

Першим кроком ми додаємо функціонал запуску виробничої лінії. Для цього було реалізовано кнопку запуску одного циклу товарів. У нашому прикладі ми додаватимемо по 20 елементів і додаватимемо їх до бази даних. Для зберігання та отримання інформації ми будемо використовувати базу даних «Postgresql». Додану кнопку початку циклу можна побачити на рисунку 4.1 [12].

Рисунок 4.1 – Кнопка запуску циклу

В результаті після того, як ми натиснули кнопку «Start product line» в нашу базу даних буде додано всю інформацію про деталі, з якою відбувалися будь-які взаємодії в даному циклі. Результат додавання елементів можна побачити на рисунку 4.2.



id uuid	is_defective bool	temperature text	humidity text	illumination text
b6ecf2dc-a2dd-4a49-8aa1-cad9d3613f3b	FALSE	23	40	939
ca075a66-fc43-4ace-b5ad-35eb37777237	FALSE	22	47	955
f4041472-3796-481f-9762-5a077693f6de	FALSE	24	31	913
8b9b0bb9-3c7f-44ec-bfb3-d5d21fc2ebe4	FALSE	20	33	947
f000a3d6-1521-43fe-91a9-da07874142cf	TRUE	23	36	909
528b4718-64bd-41bb-b58c-7614643f987e	FALSE	25	33	976
9a4e7af0-79ad-49a3-a549-ca9b615ba0e	FALSE	22	30	940
09aad20b-a397-4f2a-a68b-52d741586e9	FALSE	22	35	945
1d079760-d9fc-4780-a8e2-94d1d64e769	FALSE	25	36	964
7badebe5-a0ba-409a-92c3-f2c1a4930dd	FALSE	22	36	913
def38777-5ed6-4323-be71-a2086eceffc0	FALSE	22	37	979
79c41bca-85e2-47a7-a907-eb22d78804fa	FALSE	23	50	903
7480e1a0-c8f3-4142-8e74-322a82323880	FALSE	23	41	945

Рисунок 4.2 – Поточна база даних після початку циклу

Далі необхідно розібратися, які основні дані повинні фіксуватися на виробничій лінії. Існує безліч різних видів інформації, які зберігаються і доставляються від одного механізму до іншого. В основному дані залежать від поставленого завдання на підприємстві, але в рамках нашої роботи ми розглянемо отримання та обробку даних, які мають бути зафіксовані на ділянці збирання. Одним з головних параметрів для відстеження є час і швидкість виконання, для чого до нашої бази даних була додана певна колонка у вигляді похибки під назвою «wrongness», яка буде розрахована та виведена у вигляді графіка. Наш графік буде фіксувати, коли отримане значення за один цикл буде

вищим або нижчим за норму. В результаті ми отримаємо час, який очікувався за даний цикл і дійсний час, який у результаті було отримано за один виконаний підхід, а також відображено середню похибку за весь прогрес на даний момент. Результат графіка можна побачити на рисунку 4.3.

Рисунок 4.3 – Результат похибок відносно часу [13]

Важливим пунктом, навіть для механізованих машин, на підприємстві є освітлення приміщення. Якщо роботи взаємодіють із навколишнім середовищем і виконують завдання, що вимагають точності та чутливості до навколишніх умов, то цей пункт відіграватиме одну з важливих ролей. Для даного поля в нашій базі даних були виділені спеціальні колонки «illumination», яка зберігає в собі значення поточного освітлення в даний момент і «illumination_wrongness», що говорить нам про її похибку. Результат та середню похибку освітлення можна побачити у вигляді графіка на рисунку 4.4.

Рисунок 4.4 – Графік освітлення в приміщенні за цикл та середня похибка [13]

Також одними з досить важливих пунктів у нашому підприємстві є відсоток вологості та температура в приміщенні, які в базі даних встановлені під такими колонками, як «temperature» і «humidity». Середня температура відіграє

важливу роль, тому що впливає на енергоспоживання механічних пристроїв та впливає на їх технічні характеристики, у той час як вологість впливає на надійність збереження готових виробів та матеріалів на складі після їх сортування та на електроніку та механізм роботів. У нашій змодельованій панелі, яку можна побачити на рисунку 4.5 ми побачимо два термометри, де лівий вказує нам на середню температуру в приміщенні, а правий на відсоток вологості на підприємстві.

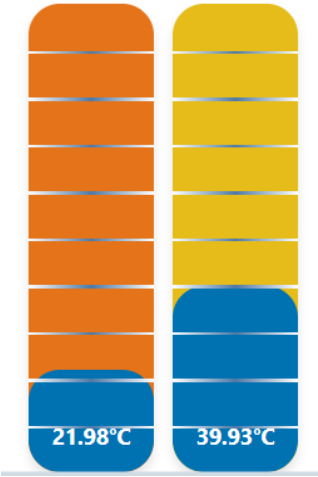


Рисунок 4.5 – Середня температура та відсоток вологості на підприємстві

У нашій панелі є кругова діаграма, яка вказує на співвідношення успішно зроблених і відсортованих деталей до деталей, які в результаті вийшли непридатними до використання, а також упущені роботами деталі, які надалі відправляться на повторний цикл. Співвідношення бракованих та пропущених мають загальний відсоток. Результат цієї кругової діаграми можна побачити рисунку 4.6.

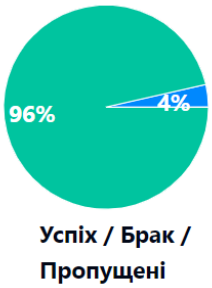


Рисунок 4.6 – Кругова діаграма бракованих та пропущених деталей до успішних

Також був доданий загальний результат, який можна побачити на рис. 4.7 де можна знову побачити середню температуру та відсоток вологості на підприємстві з кількістю успішно зроблених та відсортованих елементів та пропущених і бракованих.

Кількість успішних: 324 элементов
Кількість браку / пропущених: 12 элементов
Середня температура на виробництві: 21.98°
Середня вологість на виробництві: 39.93 %

Рисунок 4.7 – Загальний результат за отриманими даними

4.2 Загальні положення охорони праці

Всі необхідні розрахунки будуть здійснюватися автоматично, як тільки запускається повторний цикл з 20 елементів. Вибір кількості очікуваних деталей буде залежати від поставленого завдання та зберігатися в базі даних, звідки буде братися інформація для подальших розрахунків за певний робочий день. В результаті ми отримуємо повноцінну робочу модель панелі контролю за підприємством, яка практично не потребує використання людської праці. Машини самостійно виконують всі необхідні дії, що значно знижує можливі ризики через людський фактор і значно збільшується продуктивність та швидкість роботи на підприємстві.

Згідно зі ст. 15 Закону «Про охорону праці» така служба обов'язково повинна бути створена на підприємстві з кількістю працюючих 50 і більше осіб у відповідності з Типовим положенням про службу охорони праці. Також має бути розроблено Положення про службу охорони праці цього підприємства, визначено структуру такої служби, її чисельність, основні завдання, функції та права її працівників.

На підприємствах з кількістю працівників менше 50 осіб функції служби охорони праці можуть виконувати в порядку сумісництва особи, які мають відповідну підготовку. А на підприємствах з кількістю працівників менше 20 для виконання функцій служби охорони праці можуть на договірних засадах залучатися сторонні фахівці, які мають не менше трьох років виробничого стажу і пройшли навчання з охорони праці.

Обов'язок роботодавця – затвердити документи, які передбачені ст. 13 Закону «Про охорону праці». Вони повинні встановлювати правила виконання робіт і поведінки працівників на території підприємства, у виробничих приміщеннях, на будівельних майданчиках і робочих місцях. Інструкції та інша документація з охорони праці розробляються на підставі положень законодавства з охорони праці, типових інструкцій та технологічної документації підприємства з урахуванням виду діяльності підприємства і конкретних умов праці на ньому, керівниками структурних підрозділів.

Перед початком роботи нового працівника роботодавець згідно зі ст. 29 КЗпП зобов'язаний проінформувати його під розписку про умови праці, наявні на його робочому місці. У тому числі, про всі небезпечні чи шкідливі виробничі фактори, які ще не усунуто, та про можливі наслідки їх впливу на здоров'я працівника, а також про можливі пільги та компенсації за роботу в таких умовах.

Крім того, при прийнятті на роботу всі працівники повинні за рахунок роботодавця пройти вступний інструктаж, навчання, перевірку знань, первинний інструктаж на робочому місці, стажування і набуття навичок безпечних методів праці. Тільки після цього працівники допускаються до самостійної роботи. Вступний інструктаж проводить спеціаліст з охорони праці, а первинний –

безпосередній керівник працівника. Надалі з працівниками повинні проводитися повторні інструктажі, решту позапланові та цільові інструктажі. Інформація про проведення інструктажів має вноситися до відповідного журналу, завірені підписом як того, кого інструктували, так і того, хто інструктував.

Згідно зі ст. 18 Закону «Про охорону праці» працівники, зайняті на роботах з підвищеною небезпекою або там, де є потреба у професійному доборі, повинні щороку проходити навчання і перевірку знань з питань охорони праці. Навчання з питань охорони праці таких працівників може проводитися як безпосередньо на підприємстві, так і іншим суб'єктом господарювання, що займаються таким навчанням. Перевірка знань працівників з питань охорони праці повинна здійснюватися відповідною комісією підприємства, склад якої затверджується керівником підприємства.

Згідно зі ст. 169 КЗпП роботодавець зобов'язаний за свої кошти організувати проведення попереднього та періодичних медоглядів працівників, зайнятих на важких роботах, роботах із шкідливими чи небезпечними умовами праці або таких, де є потреба у професійному доборі. Також він зобов'язаний проводити щорічний обов'язковий медогляд осіб віком до 21 року.

Результати профмедогляду працівників у вигляді заключення фахівців про можливість допуску працівника до роботи заносяться в їх медичні довідки, які повинні зберігатися у роботодавця.

На роботах із шкідливими і небезпечними умовами праці, а також на роботах, пов'язаних із забрудненням або несприятливими температурними умовами, працівникам згідно зі ст. 164 КЗпП має безкоштовно видаватися спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші засоби індивідуального захисту [14].

4.3 Висновки до розділу експериментального дослідження панелі слідкування за процесом виробничої лінії

В даному розділі ми розробили програму для стеження за процесом виробничої лінії. Розглянули середовище, в якому працювали та обрали мову

програмування «JavaScript» для реалізації функціоналу. Для розробки ми розглянули, які основні поля повинні бути зафіксовані в базі даних, та реалізували отримані результати у вигляді графіків.

Також був доданий функціонал контролю за кількістю оброблених деталей та за кількістю браку або пропущених деталей, та відобразили результати на круговій діаграмі та в текстовому вигляді. Всі отримані результати були додані до бази та розраховані за допомогою їх отримання з бази.

ВИСНОВКИ

Під час написання кваліфікаційної роботи ми провели аналіз промислового інтернету речей та індустрії 4.0, де розібрали основні поняття цього напряму. Розглянули таке поняття, як промислове обладнання та розібрали основні категорії промислового обладнання:

– виробниче – машини орудня або обробні станки;

– підйомно-транспортне;

– машини-двигуні;

– технологічні;

– допоміжне.

Розглянули основні сфери, де використовуються дане обладнання. Також розібрали, що таке «Smart manufacturing», де показали принцип взаємозв'язку даного поняття зі сферою автоматизації.

Визначили, де зберігаються, а також як відбувається обмін великими даними на промисловому підприємстві, зокрема розглянули на ділянці виробничої лінії.

Саму ділянку виробничої лінії ми детально проаналізували, де описали планування та контроль виробництва, а також навели цю схему на базі Індустрії 4.0.

Також опрацювали інформацію щодо повної автоматизації виробничої лінії та навели приклади варіанта вирішення проблем, при якому будуть задіяні мінімальні людські зусилля в самому процесі складання. Для вирішення ситуацій ми розглянули логічний контролер, який здійснюватиме управління компонентами обладнання, а також для ідентифікації та впізнавання продукції використовуватиметься RFID (Radio-frequency identification). Для обміну великими даними, при яких передбачена затримка на їх отримання і які знаходяться в хмарі, ми вибрали прилад IoT Nordic Semiconductor nRF6943.

Завершальним етапом нашого аналізу розглянули конвеєр, який

контролюється за допомогою системи IIoT, які дозволяють операторам моніторити та керувати конвеєром з будь-якої точки світу через інтернет.

Була розглянута математична модель гібридного цеху. Розраховані норми на підприємстві, такі як такт виробництва, норма балансу та норма втрати балансу, включаючи тактовий час виробництва, норму балансу та коефіцієнт втрати балансу. Описано основні положення гібридного цеху та оптимізовано розміщення складальних ліній. Розроблено модель оптимізації дизайну гібридного цеху, включаючи вартість будівництва та виробничу потужність на одиницю площі виробничої лінії. Для розрахунку вартості будівництва цехової конвеєрної лінії та виробничої потужності на одиницю площі складальної лінії були визначені відповідні рівняння.

Викладено цільову функцію для мінімізації вартості будівництва та максимізації виробничої потужності на одиницю площі. Уведено умову для цільової виробничої потужності цеху та безпечного розташування складальних ліній

Розібрали та зробили опис промислової ділянки, а також спроектували модель даної ділянки. Для розробки ми обрали середовище «CoppeliaSim», де розповіли про базовий функціонал роботи з даною програмою, показали основні вікна з якими відбувається взаємодія та розібрали, що необхідно знати для створення базової логіки та реалізації рухомих моделей.

Також ми детально розповіли за кожен компонент нашої промислової лінії,

яку роль вони відіграють в роботі сортування деталей та навели приклади підходящих об’єктів на виробництві. Продемонстрували результат у рухомому виді та взаємодії.

Розробили програму для стеження за процесом виробничої лінії. Розглянули середовище, в якому працювали та обрали мову програмування «JavaScript» для реалізації функціоналу. Для розробки ми розглянули, які основні поля повинні бути зафіксовані в базі даних, та реалізували отримані результати у вигляді графіків.

Також був доданий функціонал контролю за кількістю оброблених деталей

та за кількістю браку або пропущених деталей, та відобразили результати на круговій діаграмі та в текстовому вигляді. Всі отримані результати були додані до бази та розраховані за допомогою їх отримання з бази.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

3. Що таке промислове обладнання [Електронний ресурс] – Режим доступу: www/ URL: https://kh-news.net/press-relizy/item/21728-chto-takoe-promyshlennoe-oborudovanie-vidy-osobennosti-primenenie.html

4. С.П. Новоселов, І.О. Гладков «Сучасний Промисловий Інтернет Речей та Хмарні Технолоії», матеріали VII-ої Міжнародної конференції «Виробництво & Мехатронні Системи 2023», Харків, 2023 р. – с.: 40 – 42.

5. Digital Twins: Enabling Interoperability in Smart Manufacturing Networks [Електронний ресурс] – Режим доступу: www/ URL: https://www.mdpi.com/2673-4001/4/2/16

6. Для чого використовується система технічного зору? [Електронний ресурс] – Режим доступу: www/ URL: https://kipia.ua/upload/iblock/d78/Auton_sist

7. Digital Twins-Based Production Line Design and Simulation Optimization of Large-Scale Mobile Phone Assembly Workshop [Електронний ресурс] – Режим доступу: www/ URL: https://www.mdpi.com/2075-1702/10/5/367

8. Industry 4.0 - Solutions for smart Factory Production Line [Електронний ресурс] – Режим доступу: www/ URL: https://be.farnell.com/industry-4-solutions-for-smart-production-line

9. Integrating TPM and Industry 4.0 to Increase the Availability of Industrial Assets: A Case Study on a Conveyor Belt [Електронний ресурс] – Режим доступу: www/ URL: https://www.mdpi.com/2227-9717/11/7/1956

10. Digital Twins-Based Production Line Design and Simulation Optimization [Електронний ресурс] – Режим доступу: www/ URL: https://www.mdpi.com/2075-1702/10/5/367

11. The robotics simulator CoppeliaSim (formerly V-REP) [Електронний ресурс] – Режим доступу: www/ URL: https://www.coppeliarobotics.com/

12. What is Next.js? [Електронний ресурс] – Режим доступу: www/ URL: https://nextjs.org/docs

13. Choose the type of chart you need [Електронний ресурс] – Режим доступу: www/ URL: https://recharts.org/en-US/guide/getting-started

14. Охорона праці на підприємстві [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://te.dsp.gov.ua/ohorona-pratsi-na-pidpryyemstvi-shho-potribno-znaty/