

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-10>

УДК 004.[6+8]

ПАВЛЮК Олена

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-4561-3874>

e-mail: [olena.m.pavliuk@lpnu.ua](mailto:olena.m.pavliuk@lpnu.ua)

МІЩУК Мирослав

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-8723-2514>

e-mail: [myroslav.mishchuk.mknus.2023@lpnu.ua](mailto:myroslav.mishchuk.mknus.2023@lpnu.ua)

МЕДИКОВСЬКИЙ Микола

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-2492-8578>

e-mail: [mykola.o.medykovskyy@lpnu.ua](mailto:mykola.o.medykovskyy@lpnu.ua)

ЛІТОВСЬКА Олена

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0000-5246-4008>

e-mail: [olena.litovska.kn.2021@lpnu.ua](mailto:olena.litovska.kn.2021@lpnu.ua)

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕТАПІВ РОЗРОБКИ ІЄРАРХІЧНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ В ІНДУСТРІЯХ 4.0 ТА 5.0

Проведено порівняльний аналіз технологій та етапів розробки ієрархічних автоматизованих систем управління (ІАСУ) в контексті Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0, з акцентом на розподілені системи збору та аналізу інформації і федеративне навчання для промислових підприємств, які використовують мобільні робототехнічні платформи (МРП). Основна мета роботи полягає у виокремленні технологій, інструментів та етапів розробки ІАСУ для забезпечення ефективного переходу до Індустрії 5.0. У дослідженні проаналізовано основні характеристики ІАСУ в Індустрії 4.0 та 5.0, визначено обмеження існуючих технологій Індустрії 5.0, встановлено етапи розробки ІАСУ, наведено приклади їх застосування для моніторингу та оптимізації маршрутів МРП. Описана структура ІАСУ з федеративним навчанням на основі розподіленої системи збору інформації з ІоЕ для оптимізації маршрутів МРП в Індустрії 5.0. Наведено приклади розроблених додатків для збору інформації з сенсорів портативних пристроїв виробничого персоналу.

Перевагами запропонованої структури федеративного навчання в Індустрії 5.0 є можливість підвищення ефективності методів управління промисловими підприємствами, що використовують МРП, їх гнучкості та адаптивності, економія ресурсів, зниження ризиків, покращення управління та моніторингу. Проведено аналіз обмежень існуючих технологій Індустрії 5.0 які дозволяють виявити потенційні ризики та розробити стратегії для їх мінімізації. Це сприяє підвищенню стабільності та надійності виробничих систем. Впровадження інноваційних технологій, що відповідають принципам Індустрії 5.0, сприяє сталому розвитку підприємств, забезпечуючи баланс між економічними, соціальними та екологічними аспектами.

Ключові слова: Індустрія 4.0 та 5.0, система управління, автоматизація.

PAVLIUK Olena, MISHCHUK Myroslav, MEDYKOVSKYY Mykola, LITOVSKA Olena  
Lviv Polytechnic National University

## ANALYSIS OF TECHNOLOGIES AND STAGES OF DEVELOPMENT OF INTELLIGENT HIERARCHICAL AUTOMATED MANAGEMENT SYSTEMS IN INDUSTRIES 4.0 AND 5.0

A comparative analysis of technologies and stages of development of hierarchical automated control systems (HACS) in the context of Industry 4.0 and Industry 5.0 was conducted, with an emphasis on distributed systems of information collection and analysis and federated training for industrial enterprises that use mobile robotic platforms (MRP). The main goal of the work is to identify the technologies, tools and stages of development of HACS to ensure an effective transition to Industry 5.0. The study analyzed the main characteristics of HACS in Industry 4.0 and 5.0, determined the limitations of existing technologies of Industry 5.0, established the stages of HACS development, and provided examples of their application for monitoring and optimizing MRP routes. The structure of HACS with federated learning based on a distributed IoE information collection system for optimizing MRP routes in Industry 5.0 is described. Examples of developed applications for collecting information from sensors of portable devices of production personnel are given.

The advantages of the proposed structure of federated training in Industry 5.0 are the possibility of increasing the effective management methods of industrial enterprises using MRP, their flexibility and adaptability, saving resources, reducing risks, improving management and monitoring. An analysis of the limitations of existing Industry 5.0 technologies was carried out, which allows identifying potential risks and developing strategies for their minimization. This helps increase the stability and reliability of production systems. The introduction of innovative technologies that meet the principles of Industry 5.0 contributes to the sustainable development of enterprises, ensuring a balance between economic, social and environmental aspects.

Keywords: Industry 4.0 and 5.0, controlled, automated system.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Із швидким розвитком високотехнологічних та інноваційних підходів до виробництва відбулося формулювання концепції Індустрії 5.0 як еволюції Індустрії 4.0 яка враховує посилену роль людей та їхню взаємодію з роботами. Сучасне промислове виробництво стає все більш людиноорієнтованим, в центрі якого стоїть саме людина. Перехід від Індустрії 4.0 до Індустрії 5.0 є важливим і необхідним етапом у розвитку виробничих систем, викликаним поєднанням ряду факторів. Індустрія 5.0 доповнює та розширює особливості Індустрії 4.0. Попередні досягнення в Індустрії 4.0, такі як автоматизація, використання цифрових технологій та інтернету речей, дозволили підприємствам підвищити ефективність та продуктивність виробничих процесів. Однак, з появою Індустрії 5.0, спостерігається стрімке збільшення важливості гнучкості, індивідуалізації та співпраці між людьми та автоматизованими системами. Це пов'язано з розширеним використанням штучного інтелекту, розвитком робототехніки та зростанням популярності концепції "людина-машинне співіснування". Індустрія 5.0 прагне створити умови для ефективної взаємодії між людьми та технологіями в центрі яких стоїть людина, сприяючи тим самим підвищенню інновацій та якості роботи. Таким чином, перехід до Індустрії 5.0 відображає не лише стрімкий технологічний прогрес, але й розуміння важливості людського фактора у виробничих процесах та прагнення досягнення гармонії між людськими та технологічними можливостями.

### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Протягом останніх десятиліть, Європейський Союз (ЄС) [1] відповідав на виклики, що постали перед промисловістю у зв'язку зі зростанням глобалізації та швидких технологічних змін у виробничому та інформаційному секторах. Його стратегічним пріоритетом для підвищення продуктивності став рух у напрямку Індустрії 4.0 з акцентом на застосуванні цифрових технологій. Дії ЄС спрямовані на здійснення пошуку новаторських рішень та впровадження передових технологій, що сприяють автоматизації виробничих процесів, оптимізації управління ресурсами та підвищенню конкурентоспроможності. Ця стратегія розглядається як комплексний підхід, що включає політичні, економічні та соціальні заходи, спрямовані на підтримку й розвиток цифрового промислового сектору в межах Європейського Союзу.

Досі в науковому співтоваристві триває активна дискусія щодо визначення формату класифікації п'ятої промислової революції. Одні автори стверджують, що це не просто наступний етап розвитку, а скоріше всебічне поліпшення Індустрії 4.0. Їхні роботи розглядають п'яту промислову революцію як еволюційний процес, що відбувається в межах існуючих технологічних рамок та заснований на розвитку та удосконаленні вже існуючих концепцій та практик, а не на повній революції виробничих процесів. Однак інші дослідники мають іншу точку зору та аргументи, що підтримують концепцію п'ятої промислової революції як окремого етапу розвитку, що включає в себе нові технологічні підходи та стратегії, відмінні від тих, що були в Індустрії 4.0. Такі різні погляди відображають складність та різноманіття підходів до визначення майбутнього розвитку виробничої сфери.

Основна ідея статті [2] полягає в тому, що Індустрія 5.0 розглядається як розвиток Індустрії 4.0, де автоматизація та цифрові технології використовуються для підвищення продуктивності, але з новим акцентом на збереження гуманітарних цінностей та збалансовану взаємодію між людьми та технологіями. Автор висловлює думку про необхідність введення людино-центричних підходів у виробничий процес, щоб забезпечити гармонійний розвиток суспільства та економіки. Стаття аналізує ключові аспекти Індустрії 5.0, такі як взаємодія між технологіями та людьми, роль інновацій у створенні сприятливого середовища для розвитку людських ресурсів та забезпечення сталого економічного зростання.

В публікації [3] автори досліджують перехід від цифрового виробництва до цифрового суспільства та його вплив на сучасне суспільство. Основною ідеєю статті є те, що розвиток технологій призводить до глибоких соціальних і культурних змін, що відображаються на рівні суспільства. Автори розглядають перехід як етап еволюції, де важливою є не лише вдосконалення технологічних процесів, але й переорієнтація на створення суспільства яке базується на цифрових технологіях та принципах демократизації. Автори аналізують ключові аспекти цього переходу та розглядають можливі шляхи подальшого розвитку у контексті впливу технологій на сучасне суспільство.

У статті [4] досліджено заходи, які дозволяють уникнути соціально-економічних, технологічних потрясінь та інституційного хаосу, а також розглянуто інновації, породжені ІV промисловою революцією (електронний банкінг, автоматичні безлюдні заводи, роботи-фармацевти, «розумний» одяг, 3D-друк трансплантатів), що сприяють становленню «Індустрії 4.0». Встановлено, що для впровадження «Індустрії 4.0» в Україні необхідно одночасно розвивати технологічний, виробничий та інституційно-економічний напрями, працюючи в рамках потрійної спіралі «влада–університет–бізнес» для досягнення стійких позитивних результатів.

У статті [5] автори стверджують, що найдоцільніший спосіб поєднати дві стратегії автоматизації та процесів якими керує людина, — це створити гібрид Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0, який успадковує найцінніші характеристики обох — ефективність промисловості процесів 4.0 і стійкість рішень Індустрії 5.0.

Цифрові когнітивні клони, що об'єднують поведінку людей у прийнятті рішень, представлені як сприятлива технологія для майбутнього гібриду та як прискорювач конвергенції цифрового та людського світів.

Застосування концепцій Індустрії 4.0 та 5.0 для розвитку смарт-економіки і цифрової трансформації бізнесу є актуальною задачею [6], яка переважно оцінюється через метод чистої поточної вартості. Основною перешкодою для впровадження інновацій є високі ставки дисконтування, що заважають вирішенню економічних проблем, таких як зростання нерівності доходів і стан довкілля; дослідження показують значний потенціал цифрових технологій для економічного розвитку, потребуючи подальшого вивчення.

В [7] автори стверджують, що "смарт-фабрики" є концепцією цифровізації промислових виробництв для покращення операційної діяльності та бізнес-ефективності, працюючи в межах 5-го і 6-го технологічного укладу. Авторами представлено припущення, що Індустрія Х.0, яка включає розумні активи, сервіси, бізнес та уряд, стане найвищою стадією цифровізації, орієнтуючись на технологічний розвиток за допомогою гіперінтелекту, гіперзнання, гіперінформації та гіперкомунікації, а також сприятиме формуванню B2B ринку на основі "зелених" та низьковуглецевих технологій.

### ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Однією з основних цілей статті є проведення глибокого порівняльного аналізу технологій та етапів розробки ієрархічних автоматизованих систем управління в Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0 на прикладах розподіленої системи збору та аналізу інформації і федеративного навчання для промислових підприємств які використовують мобільні робототехнічні платформи (МРП).

**Метою даної роботи** є виокремлення технологій та інструментів і етапів розробки ієрархічних автоматизованих систем управління промисловими підприємствами при переході до індустрії 5.0 та застосування їх для промислових підприємств які використовують мобільні робототехнічні платформи (МРП).

Основні завдання дослідження:

1. Провести аналіз та порівняти основні характеристики ІАСУ в Індустрії 4.0 та 5.0.
2. Визначити обмеження існуючих технологій Індустрії 5.0
3. Встановити етапи розробки ієрархічних автоматизованих систем управління в Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0
4. Навести приклади ІАСУ в Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0 для моніторингу та координації МРП.
5. Описати структуру ІАСУ з федеративним навчанням на основі розподіленої системи збору інформації з ІоЕ для оптимізації маршрутів МРП в Індустрії 5.0

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0, ієрархічні автоматизовані системи управління (ІАСУ) є ключовим елементом для забезпечення оптимізації та ефективності виробничих процесів, які адаптуються до нових вимог та викликів кожної епохи, забезпечуючи виробництво високим рівнем автоматизації та співпраці між людьми та технологіями. ІАСУ в Індустрії 4.0 є складними повністю автоматизованими виробництвами, що поєднують в собі різні рівні управління та функції для оптимізації виробничих процесів і забезпечення ефективності виробництва на яких керівництво всіма процесами здійснюється в режимі реального часу і з урахуванням мінливих зовнішніх умов. Натомість ІАСУ в Індустрії 5.0 - це комплексні системи, які поєднують в собі різні рівні автоматизації, з метою оптимізації виробничих процесів, підвищення продуктивності та реагування на зміни в реальному часі. Базовими технологіями які привели до цих революційних змін є:

- інтернет речей (Internet of Things, IoT);
- промисловий інтернет речей (Industrial Internet of Things, IIoT);
- цифрові екосистеми (Digital ecosystems);
- аналітика великих даних (Big Data Analytics).

У Індустрії 4.0 IoT дозволяють підприємствам відслідковувати в реальному часі роботу обладнання, виявляти можливі несправності та уникати аварій; аналіз зібраних даних дозволяє оптимізувати виробничі процеси, виявляти патерни несправностей та прогнозувати майбутні поломки. Натомість в Індустрії 5.0 системи IoT використовуються для створення інтерактивного середовища, в якому люди можуть взаємодіяти з роботами та автоматизованими системами; збирати дані про виробничі процеси та взаємодію з клієнтами а це допомагає підприємствам стати більш гнучкими за рахунок розширення меж автоматизації на різні галузі та процеси, включаючи логістику, управління запасами, моніторинг якості та інші аспекти виробництва.

IIoT у Індустрії 4.0 використовується для встановлення сенсорів на обладнанні та механізмах, щоб проводити моніторинг, виявляти проблеми та вчасно проводити обслуговування; збирати та аналізувати великий обсяг даних з виробничих процесів, для оптимізації продуктивності та використання ресурсів,

автоматизації ряду процесів у виробництві (контроль за обладнанням, системами управління та логістичними операціями). У Індустрії 5.0 ПоТ використовується для створення інтерактивного середовища, де люди та машини можуть ефективно співпрацювати; розширює автоматизацію на різні галузі та процеси, включаючи логістику, управління запасами та моніторинг якості. Це допомагає створити умови для гнучкого та індивідуалізованого виробництва і підвищити рівень задоволеності клієнтів та конкурентоспроможність.

ІоЕ, введений вперше в 2013 році компанією Cisco, використовується по різному в Індустріях 4.0 та 5.0. На розумних заводах використовують ІоЕ-пристрої для моніторингу обладнання в режимі реального часу. Для цього збирають дані про робочі умови, продуктивність і стан машин для прогнозного технічного обслуговування. В подальшому адаптують виробничі лінії в реальному часі залежно від змін у попиті або умовах постачання. В Індустрії 5.0 ІоЕ використовують для інтеграції роботів та інших автоматизованих систем з робочим середовищем людини та створення безпечних та ефективних умов для взаємодії людини та машини. Зібрані дані необхідні як для навчання та підвищення кваліфікації працівників так і розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Також вони необхідні для створення продукції, що відповідає індивідуальним вимогам клієнтів та забезпечують гнучкість у виробничих процесах щоб швидко пристосовуватися до змінних вимог ринку.

Цифрові екосистеми у Індустрії 4.0 дозволяють здійснювати обмін даними між різними пристроями, системами та учасниками виробничого процесу; створюють платформи для співпраці між різними учасниками виробничого ланцюжка, такими як виробники, постачальники, дистриб'ютори та клієнти і стимулюють інновації шляхом створення сприятливого середовища для співпраці та обміну ідеями між різними гравцями на ринку. За рахунок цього можна оптимізувати виробничі процеси, покращувати якість продукції та реагувати на зміни в реальному часі. В Індустрії 5.0 цифрові екосистеми створюють платформи, які дозволяють людям та машинам ефективно співпрацювати та взаємодіяти створюючи персоналізовані середовища для співпраці та комунікації між різними учасниками виробничого процесу шляхом інтеграції різних технологій та систем для створення уніфікованих та злагоджених виробничих процесів. Це допомагає підприємствам досягати більшого рівня гнучкості та індивідуалізації виробництва; наблизитися до ідеалу "виробництва на замовлення" і задовольняти унікальні потреби кожного клієнта та забезпечити максимальну ефективність та продуктивність виробництва.

Аналітика великих даних у Індустрії 4.0 дозволяє підприємствам збирати і аналізувати історичні дані щоб відслідковувати виробничі процеси з метою виявлення аномалій, робити прогнози та оптимізувати роботу обладнання, виробничих ліній та інших ресурсів. Великі дані також дозволяють аналізувати відгуки клієнтів, дані про якість продукції та інші параметри, що допомагає підприємствам покращувати якість продукції та задовольняти потреби ринку. В Індустрії 5.0 аналітика великих даних дозволяє адаптувати виробничі процеси для виготовлення індивідуальних продуктів та послуг, що відповідають унікальним потребам кожного клієнта; допомагають підприємствам прогнозувати зміни у виробничому середовищі, попиті на продукцію та інші фактори для вчасної реакції на зміни та адаптувати виробництво до нових умов; зрозуміти, як ефективно координувати взаємодію між людьми та автоматизованими системами для досягнення максимальної продуктивності та якості роботи. В таблиці 1 наведено порівняння основних характеристик ІАСУ в Індустріях 4.0 та 5.0.

#### **Обмеження існуючих технологій Індустрії 5.0**

В Індустрії 5.0 велике значення має інтеграція різноманітних технологій, таких як штучний інтелект, машинне навчання, аналітика даних, блокчейн [8] тощо. Забезпечення сумісності та спільної роботи цих технологій може бути складною задачею. Обробка, зберігання та аналіз великого обсягу даних, які збираються від підключених пристроїв, вимагає розвинутих систем управління даними та аналітики. Використання даних, зібраних з підключених пристроїв, повинно відбуватися в рамках встановлених правил та нормативів, що стосуються приватності та етики. Важливо враховувати інтереси та права користувачів.

Найважливішими технологіями Індустрії 5.0 є штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML), які мають ряд обмежень. Успішне впровадження AI та ML передбачає наявність великої кількості якісних даних. Обробка великих обсягів даних може викликати проблеми з конфіденційністю та захистом особистих даних, особливо в контексті строгих правил щодо захисту приватності, таких як GDPR - регламенту спрямованого на захист персональних даних усіх фізичних осіб в ЄС [9]. Збір великих обсягів даних не завжди гарантує наявність якісних даних. Необхідно мати доступ до достовірної, актуальної та репрезентативної інформації для успішного використання Big Data у виробничих процесах. Обробка великих обсягів даних може вимагати значних обчислювальних ресурсів та ефективних алгоритмів обробки, але не всі підприємства для цього мають необхідні технічні можливості. При використанні великих даних можуть виникати етичні питання, зокрема, пов'язані зі зберіганням, використанням та обробкою особистих даних. Інтеграція великих даних з існуючими системами та процесами виробництва може бути складною. Необхідно мати відповідні технологічні рішення та ефективний план впровадження для успішної інтеграції великих даних у виробничі середовища.

Таблиця 1

**Порівняння основних характеристик ІАСУ в Індустріях 4.0 та 5.0.**

Індустрія 4.0	Індустрія 5.0
<p>Основний акцент робиться на використанні IoT для збору даних від різних пристроїв та обладнання, що забезпечується підключенням їх до мережі. Ці дані передаються на централізований сервер для обробки та аналізу за допомогою хмарних обчислень. Така система дозволяє здійснювати моніторинг та управління виробничими процесами, а також оптимізацію та прогнозування шляхом аналізу великих обсягів даних.</p>	<p>Використання IoE розширюючи поняття IoT, включає не лише пристрої, а й людей, процеси та додатки. Тому система враховує не лише дані від обладнання, а й інформацію про працівників, їхню активність та спілкування з системами. Це дозволяє створювати більш гнучкі та інтегровані системи, які можуть адаптуватися до змінних умов виробництва та взаємодіяти з людьми у більш природний спосіб.</p>
<p>Технології які використовуються для автоматизації рутинних та повторюваних завдань у виробництві. Ці роботи часто працюють в обмеженому просторі та виконують певні завдання, такі як збірка, пакування, завантаження та розвантаження. Коботи, або колаборативні роботи, використовують лише для: монтажу і складання; пакування та палетування; тестування і контролю якості; логістики та технічного обслуговування.</p>	<p>Роботи використовують для розширення здатностей людини, а не просто для заміщення рутинних завдань, наприклад у складі команди з людьми для спільного вирішення складних завдань або навіть для навчання та підтримки працівників. Колаборативні роботи інтегрують свою роботу з людською працею. Коботи можуть використовуватися для підтримки працівників у вирішенні складних завдань, співпраці з людьми у виробництві та навіть для навчання нових працівників.</p>
<p>Людино-орієнтовані технології виробництва спрямовані на вдосконалення процесів, збільшення ефективності та зниження витрат. Проте, це не завжди означає, що система максимально враховує потреби та зручність працівників. Підходи до роботи більш орієнтовані на впровадження технологій, які полегшують роботу персоналу та покращують умови праці, але це не завжди ставить людину в центр управління виробництвом.</p>	<p>Важливим аспектом є забезпечення технологій та процесів, які максимально враховують потреби та інтереси працівників. Системи проєктують та впроваджують з урахуванням того, що люди є найважливішим активом у виробництві. Людино-центричні технології, оскільки пріоритетом є створення виробничих систем, де людина знаходиться в центрі управління та виробничих процесів. Технології використовуються з метою підтримки та покращення людської праці, а не заміщення її. Важливим є співробітництво між технологіями та людським фактором для досягнення оптимальних результатів.</p>
<p>Оптимізація виробничих процесів полягає у використанні технологій IoT, IIoT, Big Data та машинного навчання забезпечують збір та аналіз великих обсягів даних з виробничих процесів. Це дозволяє виявляти ефективні та неефективні аспекти виробництва, зменшувати витрати, оптимізувати час та ресурси, а також підвищувати якість продукції. Оптимізація часто зосереджена на підвищенні продуктивності, зниженні витрат та збільшенні прибутковості на різних етапах виробничого процесу. Це може включати автоматизацію складів, оптимізацію логістичних процесів та впровадження новітніх технологій на кожному етапі виробництва.</p>	<p>Оптимізація виробничих процесів враховує не лише швидкість та ефективність, але й комфорт та безпеку працівників. Впроваджуються технології, що допомагають працівникам у виконанні завдань та спілкуванні зі системами. Оптимізація всього ланцюжка створення вартості враховує не лише виробничі аспекти, але й взаємодію з клієнтами та споживачами, екологічні аспекти виробництва та соціальну відповідальність підприємства. Важливо не лише створити ефективний продукт, але й забезпечити його прийняття споживачами та мінімізувати негативний вплив на середовище.</p>
<p>У кібер-фізичних системах фізичні процеси об'єднуються з комп'ютерними та мережевими системами, щоб створити інтегровані та взаємодіючі системи. CPS використовується для моніторингу та управління виробничими процесами в реальному часі, забезпечуючи швидку реакцію на зміни та оптимізацію робочих потоків. Використання алгоритмів машинного навчання, штучного інтелекту та аналітики даних дозволяє оптимізувати виробничі процеси, знижувати витрати та підвищувати продуктивність. Ці системи можуть використовуватися для планування виробництва, управління запасами, маршрутизації МРП та інші оптимізаційні завдання.</p>	<p>CPS використовується для створення зв'язку між людьми та машинами, щоб підтримувати співпрацю та взаємодію. Наприклад, це може бути система, яка допомагає роботі та спілкуванню працівників зі складним обладнанням або роботами. Оптимізаційні системи спрямовані не лише на ефективність та продуктивність, але й на забезпечення комфорту та безпеки працівників, оскільки вони можуть враховувати соціальні та етичні аспекти виробництва, а не лише економічні показники.</p>
<p>Використання великих обсягів даних дозволяє збирати, аналізувати та отримувати цінну інформацію з виробничих процесів, виробляти звіти та інсайти для прийняття управлінських рішень. Наприклад, аналіз даних може допомогти виявити тренди в попиті на продукцію або виявити потенційні проблеми виробництва. Застосування прогностичної аналітики та машинного навчання дозволяє передбачати майбутні події та тренди на основі аналізу історичних даних. Наприклад, прогностичні моделі можуть допомогти у визначенні оптимального часу для профілактичного обслуговування обладнання або управління запасами.</p>	<p>Застосування Big Data та аналітики спрямоване на забезпечення комфорту та безпеки працівників, а також на забезпечення зв'язку з клієнтами та споживачами. Наприклад, аналітика даних може допомогти визначити оптимальні умови роботи для працівників або персоналізувати взаємодію з клієнтами. Прогностична аналітика та машинне навчання використовують для прогнозування потреб працівників у підтримці, управлінням та іншими аспектами. Наприклад, системи машинного навчання можуть прогнозувати витрати на ресурси або допомагати в плануванні робочих графіків.</p>

Розробка та впровадження AI та ML систем вимагає експертних знань у галузі технологій штучного інтелекту, що може бути викликом для багатьох підприємств які не мають таких експертів. Впровадження

AI та ML може бути складним через необхідність інтеграції з існуючими системами та процесами виробництва. Одержані результати можуть не завжди бути ефективно використані виробничими підприємствами через відсутність адаптації або інтеграції з процесами виробництва. Використання AI та ML може викликати етичні питання, зокрема, пов'язані з прозорістю, відповідальністю та справедливістю алгоритмів. Наприклад, рішення, прийняті на основі алгоритмів, можуть бути дискримінаційними.

Також існує розрив між очікуваннями щодо технології 5G та її реальними можливостями у сфері ІоЕ [10] яке пов'язане з рядом обмежень. Збільшення кількості підключених пристроїв у Інтернеті різноманітних сфер (включаючи виробництво) створює значні виклики у забезпеченні безпеки та конфіденційності даних. Велика кількість підключених пристроїв може створити проблеми з масштабованістю системи, особливо коли розглядається робота з великим обсягом даних та може вимагати великої кількості енергії. Ефективне використання енергії та розробка енергоефективних рішень є ключовим аспектом.

Обмеження використання роботів для розширення здатностей людини включають недостатній розвиток технологій співпраці роботів і людей та інших роботів у вирішенні складних завдань. Роботи повинні бути розроблені з урахуванням безпеки та надійності, щоб уникнути можливих травм або пошкоджень у разі співпраці з людьми. Важливо враховувати соціальні та етичні аспекти використання роботів, зокрема, у забезпеченні справедливості, рівності та дотримання прав працівників. Роботи повинні навчатися та адаптуватися до змін в оточенні та вимог завдань, а також співпрацювати з людьми у вирішенні нових та складних завдань та інтегруватися в робоче середовище і взаємодіяти з існуючими процесами та системами. Використання роботів повинно бути економічно обґрунтованим, з урахуванням витрат на їх розробку, впровадження та обслуговування, а також потенційних економічних вигод від їх використання.

Технологія блокчейн забезпечує безпеку та достовірність даних шляхом децентралізованого збереження та криптографічного захисту, що може бути корисним для забезпечення інтеграції даних та підтримки цифрових та інноваційних моделей бізнесу. Проте її використання в Індустрії 5.0 має ряд обмежень. Основне - обмежена масштабованість технології блокчейн. При високих обсягах транзакцій швидкість обробки та підтвердження може бути повільною, що ускладнює її застосування у великих виробничих середовищах. Використання блокчейн є витратним процесом, особливо щодо великих обсягів даних та операцій, що може бути непосильним для малих та середніх підприємств. Хоча блокчейн вважається децентралізованою технологією, безпека даних та конфіденційність можуть бути порушеними, якщо не дотримуватися належних заходів безпеки. Це особливо важливо в індустрії, де конфіденційність та безпека даних мають вирішальне значення. Різні країни мають різні правові рамки та регуляторні вимоги щодо використання блокчейн технології. Невизначеність та непередбачуваність середовища може обмежувати прийняття технології блокчейн в окремих секторах індустрії. Інтеграція блокчейн з існуючими інформаційними системами та процесами може бути складною. Необхідно забезпечити сумісність та ефективну взаємодію між блокчейн інфраструктурою та існуючими системами у виробничих середовищах.

Важливим обмеженням технології блокчейн є необхідність забезпечення безпеки та конфіденційності даних, що обробляються системами CPS. Це особливо важливо в контексті використання особистих даних працівників або конфіденційної інформації про підприємство. Для успішної реалізації CPS необхідно вирішити питання інтероперабельності та стандартизації. Це дозволить різним системам та пристроям взаємодіяти між собою та з іншими системами без проблем. Впровадження CPS може бути складним процесом через необхідність інтеграції з існуючими системами та процесами виробництва. Це може вимагати значних зусиль та ресурсів, змін у виробничих процесах та навичках працівників. Тому важливо забезпечити ефективну стратегію управління змінами та навчання персоналу. Застосування CPS може винести на перший план етичні аспекти, такі як прозорість, відповідальність та справедливість. Для успішного використання CPS важливо забезпечити ефективне використання ресурсів, таких як енергія та обчислювальна потужність. Необхідно враховувати енергоефективність та оптимізацію використання обчислювальних ресурсів.

Цифрові двійники (Digital Twins) базуються на даних, зібраних з фізичних об'єктів за допомогою сенсорів і інших пристроїв IoT (Інтернет речей), та використовують аналітичні інструменти й алгоритми для створення віртуальних моделей, що імітують реальні умови та поведінку об'єктів. Обмеження використання Digital Twins в Індустрії 5.0 мають велику складність реалізації та вимагають значних зусиль для створення точних віртуальних моделей, особливо для складних систем або об'єктів. Отримання консистентних та достовірних даних для оновлення Digital Twins залежить від складності даних з різних джерел або систем. Обробка великого обсягу даних та підтримка віртуальних моделей може вимагати значних обчислювальних ресурсів та інфраструктури. Забезпечення безпеки віртуальних моделей та даних, що використовуються для Digital Twins, може бути складним завданням через потенційні загрози кібербезпеки та конфіденційності. Підтримка актуальності та відповідності віртуальних моделей до реальних об'єктів протягом їх життєвого циклу може бути складною задачею, особливо в умовах швидких змін технологій та виробництва.

Відсутність стандартів та узгоджених підходів до розробки та використання Digital Twins може ускладнити їх інтеграцію та взаємодію з іншими системами.

У Індустрії 5.0 Digital Twins, розширена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR) можуть взаємодіяти для створення більш інноваційних та ефективних рішень. Проте вони все ще можуть мати обмеження щодо якості графіки, швидкості обробки та надійності пристроїв. Це може обмежувати їхнє використання у виробничих середовищах, де необхідно надійне та ефективне функціонування технологій. Впровадження AR та VR може бути витратним процесом. Відсутність доступних та ефективних рішень для виробництва може обмежувати їхнє використання в малих та середніх підприємствах. А також може вимагати підготовки персоналу та часу на адаптацію до нових технологій. Навіть якщо технології дозволяють покращити процеси, вони можуть бути відхилені або використовуватися неефективно через неспроможність працівників швидко освоювати нові засоби. Не всі працівники можуть комфортно використовувати AR та VR технології через індивідуальні особливості сприйняття або медичні обмеження. Інтеграція AR та VR з існуючими системами у виробничих середовищах може виявитися складною та вимагати значних зусиль для забезпечення сумісності та ефективності роботи.

Парадигма обчислення Edge Computing в Індустрії 5.0 має деякі обмеження щодо обчислювальних ресурсів на рівні краєвих пристроїв, що обмежує їхню здатність до обробки складних завдань. Швидкість та пропускну здатність мережі можуть обмежувати можливості передачі даних між краєвими пристроями та центральними обчислювальними центрами. Передача та зберігання даних на краєвих пристроях може створювати проблеми з безпекою, оскільки ці пристрої можуть бути більш вразливими до кібератак та несанкціонованого доступу. Інтеграція та сумісність з існуючими централізованими системами обробки даних може виявитися складною через різницю у технологічних підходах та протоколах. Ефективне управління та моніторинг крайовими ресурсами може бути складним завданням через їх розподілену природу та обмежену можливість для централізованого контролю. Впровадження інфраструктури Edge Computing може вимагати значних інвестицій у нові обладнання та технології, що може бути обмежувальним фактором для деяких організацій.

Хоча потенціал квантових обчислень надзвичайно великий, вони також зазнають певних обмежень, особливо в контексті їх використання в Індустрії 5.0. Наразі квантові обчислення залишаються в ранній стадії розвитку, існують технічні виклики, пов'язані зі стабільністю квантових бітів (кьубітів), їх довготривалістю та управлінням помилками. Ці технічні обмеження ускладнюють широке застосування квантових обчислень у промисловості. Хоча квантові комп'ютери можуть ефективно обробляти великі обсяги даних, їх можливості в обробці та аналізі даних поки що обмежені. Деякі завдання, які можуть бути ефективно вирішені квантовими обчисленнями, ще потребують додаткового дослідження та розвитку алгоритмів. Розробка та використання квантових комп'ютерів вимагає значних інвестицій у дослідження, розробку та інфраструктуру. Вартість квантових обчислень залишається високою, що робить їх недосяжними для більшості підприємств. Хоча квантові обчислення можуть принести значні переваги у сфері криптографії та кібербезпеки, вони також можуть створити нові виклики для кібербезпеки, оскільки квантові комп'ютери можуть ламати більшість сучасних криптографічних систем. Впровадження квантових технологій у виробничі процеси може вимагати значних зусиль для інтеграції з існуючими інформаційними та виробничими системами. Розробка стандартів та протоколів для взаємодії між квантовими та класичними системами є складним завданням.

### **Етапи розробки ієрархічних автоматизованих систем управління в Індустріях 4.0 та 5.0**

Розробка ІАСУ в Індустріях 4.0 та 5.0 повинна пройти через наступні етапи:

1. Ініціювання та стратегічне планування: визначення стратегічних цілей та завдань, пов'язаних з впровадженням ІАСУ; аналіз потреб і можливостей підприємства для оптимізації виробничих процесів та підвищення ефективності.

2. Вибір технологічної платформи: вибір підходящих технологій та програмного забезпечення для створення інтегрованої системи управління; оцінка рівня сумісності з наявною інфраструктурою та обладнанням.

3. Розробка концепції ІАСУ: створення концептуальної моделі ієрархічної системи управління, визначення ролей та функцій кожного рівня; розробка архітектури системи та визначення протоколів комунікації між підсистемами.

4. Впровадження та інтеграція: поступове впровадження інтегрованих компонентів ІАСУ на різних рівнях управління; інтеграція системи з існуючим обладнанням та програмним забезпеченням.

5. Налаштування та оптимізація: налаштування параметрів системи з урахуванням специфіки виробничих процесів та вимог користувачів; постійна оптимізація роботи системи на основі зібраних даних та відгуків користувачів.

6. Навчання персоналу: проведення навчальних заходів та тренінгів для персоналу з використання нової системи управління; формування команди експертів, які зможуть відповідати за підтримку та розвиток системи.

7. Підтримка та постійне вдосконалення: забезпечення технічної підтримки та вирішення проблем, що виникають у процесі експлуатації; постійне вдосконалення системи на основі нових технологій та вимог ринку.

Перший етап розробки ІАСУ у Індустрії 4.0 полягає у визначенні потреб і вимог до системи управління. Це включає вивчення процесів виробництва, ідентифікацію точок оптимізації та визначення функцій, які має виконувати ІАСУ. На етапі проектування розробляється концепція системи управління, включаючи структуру, алгоритми роботи, вибір технологій та компонентів. Після проектування ІАСУ, реалізується цей проект. Це включає розробку програмного забезпечення, підключення сенсорів, контролерів та інших компонентів, необхідних для функціонування системи. Після впровадження системи управління проводиться тестування для перевірки її працездатності, надійності та ефективності. Також на цьому етапі відбувається налагодження системи для оптимального функціонування. Після успішного впровадження і налагодження системи управління вона починає працювати в реальному середовищі. Важливо забезпечити її ефективну експлуатацію та надавати підтримку для вирішення можливих проблем.

Розробка ІАСУ в Індустрії 5.0 розпочинається із стратегічного планування. На цьому етапі визначаються стратегічні цілі і завдання системи управління, враховуючи вплив цифрових технологій на виробництво та управління. Далі розробляється концепція інтелектуальної системи управління, включаючи архітектуру, моделі роботи, інтерфейси та взаємодію з користувачами та іншими системами. На етапі розробки та імплементації проводиться програмування та інтеграція інтелектуальних алгоритмів, сенсорів, мережних зв'язків та іншого обладнання, необхідного для роботи ІАСУ. Після розробки системи проводяться випробування для перевірки її ефективності, безпеки та відповідності вимогам. Також на цьому етапі може проводитися оцінка впливу системи на виробничий процес та планування подальших кроків. Після успішного тестування систему впроваджують в реальному виробничому середовищі. Під час впровадження важливо забезпечити навчання персоналу, налагодження системи та її оптимізацію для досягнення максимальної ефективності. Після впровадження системи виробництва важливо забезпечити її постійний моніторинг для виявлення можливих проблем та надання підтримки для їх вирішення. Також важливо вносити зміни та покращення в систему з часом з урахуванням змін виробничого процесу та технологій. В таблиці 2 наведено порівняння етапів розробки ІАСУ в Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0.

Таблиця 2.

**Порівняльна характеристика етапів розробки ІАСУ в Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0**

1. Стратегічне планування	
Спрямоване на впровадження цифрових технологій у виробничі процеси.	Спрямоване на інтеграцію людського фактору та інтелектуальних систем, зокрема розумних робочих місць та індивідуального підходу до керування.
2. Концепція та дизайн	
Акцент робиться на автоматизації та підвищенні продуктивності.	Дизайн систем спрямований на створення інтелектуальних і адаптивних рішень, здатних працювати в команді з людьми та змінюватися в залежності від потреб.
3. Розробка та імплементація	
Розробка та інтеграція цифрових технологій, таких як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI) та аналітика даних.	Розробка інтелектуальних інтерфейсів та систем з підтримкою прийняття рішень, що базуються на аналізі даних та співпраці з людьми.
4. Тестування та оцінка	
Тестування спрямоване на перевірку функціональності та ефективності автоматизованих процесів.	Тестування включає оцінку взаємодії між людьми та системами, а також аналіз впливу інтелектуальних систем на організаційну культуру та продуктивність
5. Впровадження та оптимізація	
Підвищенні автоматизації та оптимізації виробничих процесів.	Забезпечення адаптивності систем, здатності до швидкої зміни та інтеграція з різними джерелами даних та технологіями.

### Приклад ІАСУ в Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0 для моніторингу та координації МРП

Наведемо приклади ІАСУ на основі розподіленої системи збору інформації з IoT в Індустрії 4.0. А саме:



- сенсорів МРП (лідар, ультразвукові сенсори), контролю стану батареї та моніторингу продуктивності. Тобто з МРП отримуємо дані про їхнє місцезнаходження, швидкість, напрямок руху та стан батареї.
- інфраструктурних сенсорів, які встановлені по всьому підприємству, для моніторингу трафіку, перешкод та стану підлоги. Вони збирають дані про трафік на маршрутах, наявність перешкод, стан підлоги (наприклад, слизькість) та інші умови.
- портативних пристроїв (смарт годинників та смартфонів) працівників для визначення їх місцезнаходження та виду діяльності, що допомагає уникати зіткнень з МРП та оптимізувати їх маршрути з урахуванням робочих зон.

На рис. 1 зображено частину ІАСУ на основі розподіленої системи збору інформації з IoT та PoT в Індустрії 4.0

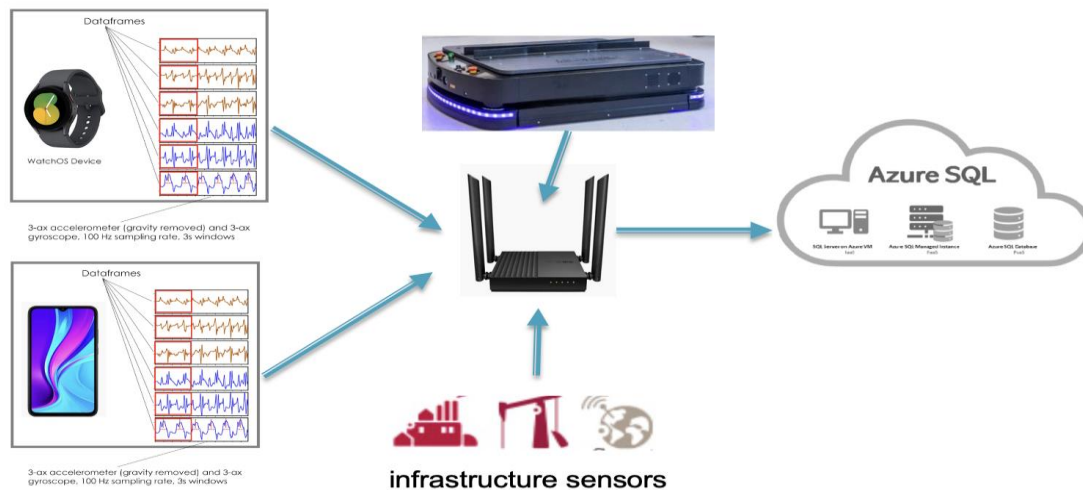


Рис. 1 Розподілена система збору інформації з IoT та PoT в індустрії 4.0

Для збору та обробки даних: задіють локальні контролери МРП для попередньої обробки даних з сенсорів та виконання базових навігаційних алгоритмів. Локальні контролери на МРП попередньо обробляють дані з сенсорів для виконання базових функцій навігації та уникнення перешкод. Далі ці дані з локальних контролерів та смарт годинників передаються через мережві шлюзи до централізованої системи управління. Дані з локальних контролерів передаються до централізованої бази даних через мережві шлюзи для подальшого аналізу та оптимізації. Дані з усіх сенсорів та МРП зберігаються у централізованій базі даних для аналізу, найчастіше її реалізують у хмарі, наприклад Azure.

Наведемо приклад параметрів що збирають з сенсорів МРП Formica 1, який випускає фірма AIUT в Глівіцах у Польщі. Всі типи параметрів розміщені у фреймі починаючи з 1 до 188 байтів. Перед надсиланням кадру по протоколу TCP встановлюють формат DTL від Siemens. Перших 3 байти сигнаізують про початок датафрейму, 4 і 5 байти - це його ідентифікатор, 6 та 7 байти відповідають за статус передачі датафрейму. Із 8 по 12 байти записують дату та час цього датафрейму. 13 і 14 байти - це основні сигнали, які відповідають за різноманітні діагностичні повідомлення. Байти із 15 по 20 відповідають за сигнали безпеки. З 21 по 24 байти це статус ледів які сигнаізують про стан в якому перебуває МРП (швидкість в різних зонах чи аварійну ситуацію, режим очікування та ін.). 25 та 26 байти відповідають за статуси виключень, а з 27 по 30 інші статуси і на даний момент вони є зарезервними та не використовуються. Із 31 по 38 байти відповідають за сигнали лівого приводу, а з 43 по 46 - правого. Байти 47 та 48 відповідають за сигнали гальмування МРП, а 49 та 50 - дозволи на роботу в різноманітних режимах (ручному, автоматичному та ін). 51 та 52 байти - сигнали підйомної пластини, із 53 по 62 інформація про алярмові стани МРП, із 63 по 66 - інформація про попередження, а із 67 по 70 - виведення повідомлень. Із 71 по 82 байти - сигнали одометрії, із 83 по 98 - сигнали по електроенергетиці, із 99 по 106 - сигнали нахилу, із 107 по 162 - навігаційні сигнали, із 143 по 162 - зворотний зв'язок команд природної навігації, із 163 по 172 колаборативний зворотній зв'язок роботів, із 173 по 188 - енергетичні сигнали спільного робота.

Для цілей збору інформації з сенсорів портативних пристроїв виробничого персоналу, а саме смарт годинників розроблена система збору даних. Вона складається з програми для смарт-годинника та хмарного сервера. Додаток розроблено для смарт-годинника Samsung Galaxy Watch 5 на базі операційної системи WearOS. Основною метою програми є збір даних сенсорів із 3 секундною дискретністю, відправка їх на хмарний сервер і надання інтерфейсу для керування процесом збору даних. WearOS було обрано як операційну систему вибору через її надійний API і високий ступінь адаптивності щодо взаємодії апаратних

сенсорів. Galaxy Watch 5 визнали кращим за альтернативи завдяки своєму потужному набору датчиків, які можна використовувати для подальшої роботи. Мова програмування Kotlin була використана як поточний стандарт для розробки WearOS та AndroidOS. Приклади деяких екранів інтерфейсу користувача програми зображені на рис. 2.

На рис. 2 зображено аплікацію для збору даних зі смарт годинника.



Рис.2. Деякі екрани аплікації WearOS: (а) Екран початку/зупинки збору даних сенсора; (б) Екран керування сукупними подіями; (в) Екран вибору типу діяльності.

Хмарний сервер, розроблений на базі MySQL Server під хмарною платформою як послуга (PaaS), був обраний завдяки надійній масштабованості та розширеним можливостям безпеки. Основне призначення сервера — зберігання даних для подальшої обробки та аналізу, що підвищує ефективність дослідження. Такий вибір зумовлений його продуктивністю, масштабованістю та сумісністю з хмарними рішеннями, що забезпечує оптимальне управління даними. Перелік сигналів які знімають за допомогою смарт годинника представлений в таблиці 3.

Таблиця 3.

**Перелік сигналів які отримують зі смарт годинників виробничого персоналу промислового підприємства**

Назва параметра англійською мовою	Назва параметра українською мовою
Accelerometer (X, Y, Z)	Акселеромерт (X, Y, Z)
Gyroscope (X, Y, Z)	Гіроскоп (X, Y, Z)
Magnetometer (X, Y, Z)	Магнетометр (X, Y, Z)
Rotation vector (quaternion)	Вектор повороту (кватерніон)
Barometer	Барометр
Electrocardiogram (ECG, ECG)	Електрокардіограма (ЕКГ, ECG)
Photoplethysmogram (FPG, PPG)	Фотоплетизмограма (ФПГ, PPG)

Акселерометр вимірює лінійне прискорення вздовж трьох ортогональних осей (X, Y, Z). Ці сигнали використовуються для оцінки рухів та положення користувача, виявлення фізичної активності, таких як кроки, біг, або зміну положення тіла. Сигнали акселерометра також використовують для автоматичного регулювання орієнтації екрану. Гіроскоп реєструє кутові швидкості обертання навколо трьох ортогональних осей (X, Y, Z). Ці дані дозволяють визначити орієнтацію та обертальні рухи смарт годинника. Сигнали гіроскопа використовуються для покращення точності моніторингу фізичної активності, стабілізації зображення та поліпшення взаємодії з користувачем. Магнетометр вимірює компоненти магнітного поля вздовж трьох ортогональних осей (X, Y, Z). Ці дані застосовуються для визначення орієнтації відносно магнітного поля Землі, що дозволяє використовувати смарт годинник як компас. Сигнали магнетометра також використовують для покращення навігаційних функцій та корекції даних акселерометра і гіроскопа. Вектор повороту, представлений у вигляді кватерніона, описує орієнтацію смарт годинника у тривимірному просторі. Кватерніони забезпечують безсингулярне представлення орієнтації та дозволяють уникати проблем, пов'язаних з ефектом "гімбальної блокади". Цей метод представлення орієнтації широко використовується для трекінгу рухів і покращення інтерфейсів доповненої реальності. Барометр вимірює атмосферний тиск, що дозволяє оцінювати висоту над рівнем моря з високою точністю. Ці дані використовуються для покращення навігаційних функцій, моніторингу висоти під час фізичної активності, такої як підйом на гору, та для оцінки зміни положення користувача по вертикалі. Електрокардіограма реєструє електричну активність серця, що дозволяє аналізувати серцевий ритм і виявляти аритмії, такі як

фібриляція передсердь. Сигнали ЕКГ використовуються для моніторингу серцевого стану виробничого персоналу в режимі реального часу та для діагностичних цілей, зокрема в телемедицині. Фотоплетизмограма реєструє зміни об'ємного кровотоку в тканинах шляхом вимірювання змін інтенсивності світла, яке проходить через або відбивається від тканин. Сигнали ФПГ використовуються для оцінки частоти серцевих скорочень, насичення киснем крові та варіабельності серцевого ритму. Ця технологія широко застосовується для моніторингу фізіологічного стану та оцінки стресу виробничого персоналу.

На рис.3. Зображено розроблену аплікацію для збору даних зі смартфона.

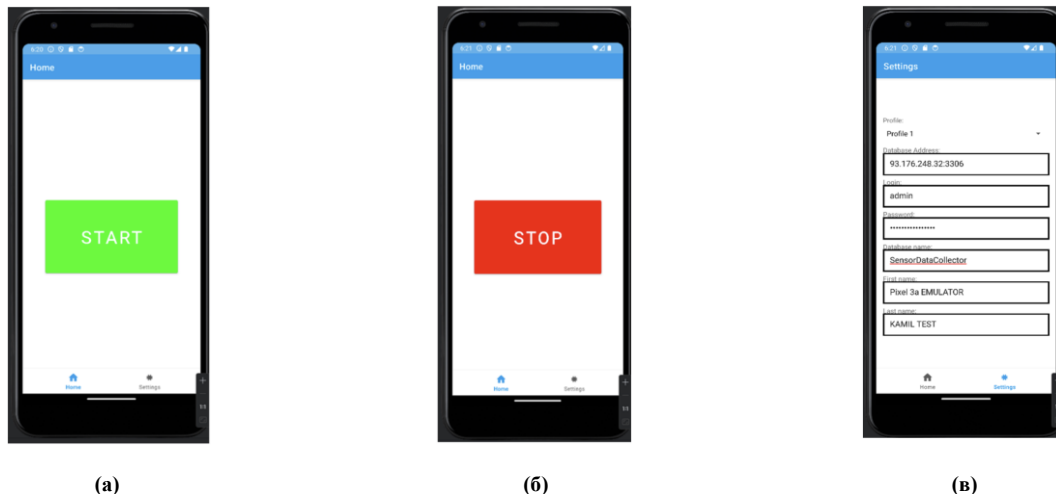


Рис.3. Деякі екрани аплікації для збору даних зі смартфона (а) Екран початку збору даних датчика; (б) Екран зупинки збору даних; (в) Екран реєстрації користувача та підключення його до хмарної бази даних

Аплікація написана мовою Kotlin під операційну систему Android. У вікні «Налаштування» вибирають опції підключення сенсорів смартфона до бази даних. Для цього виділено кілька полів:

- Профіль — дозволяє вибрати один із трьох готових даних для входу, щоб не було необхідності вводити їх повторно.
- Адреса бази даних – IP-адреса бази даних, де зберігаються дані.
- Вхід – вхід до бази даних
- Пароль – Пароль для бази даних
- Ім'я бази даних – ім'я конкретної бази даних, у якій зберігаються дані.
- Ім'я/Прізвище – можливість вводити ім'я та прізвище користувача для групування джерел даних.

Програма зберігає налаштування на пристрої, тому після перезапуску пристрою/програми ми можемо повернутися до попередньо обраного профілю, не налаштовуючи його знову. Перелік сигналів які знімають за допомогою смартфона представлений в таблиці 4.

Таблиця 4.

**Перелік сигналів які отримують зі смартфонів виробничого персоналу промислового підприємства**

Назва параметра англійською мовою	Назва параметра українською мовою
Accelerometer (X, Y, Z)	Акселеромерт (X, Y, Z)
Gyroscope (X, Y, Z)	Гіроскоп (X, Y, Z)
Magnetometer (X, Y, Z)	Магнетометр (X, Y, Z)
Rotation vector (quaternion)	Вектор повороту (кватерніон)
Light sensor	Сенсор освітленості

Аналогічним чином згідно стандарту OPC UA здійснюють збір даних з інфраструктурних сенсорів промислового підприємства. До них належать: температурні сенсори, вологості, атмосферного тиску, вібраційні сенсори, сенсори рівня рідини в резервуарах, сенсори газу та ін. Їх застосовують для широкого спектру збору інформації на промислових підприємствах, що сприяє підвищенню ефективності, безпеки та якості виробничих процесів.

Алгоритми аналізу даних (наприклад, статистичні чи алгоритми машинного навчання та оптимізації) використовують для оптимізації маршрутів МРП на основі поточних і прогнозованих умов. Аналітичні алгоритми в центральній системі аналізують зібрані дані для визначення оптимальних маршрутів МРП. Для цього часто використовують алгоритми, такі як Дейкстри або генетичні алгоритми для визначення найкоротших та найефективніших маршрутів для кожного МРП. Також враховують поточні та прогнозовані умови, такі як завантаженість маршрутів, наявність перешкод та активність персоналу.

Централізована система управління, що інтегрує дані з усіх джерел приймає рішення щодо оптимальних маршрутів МРП. Вона передає оптимізовані маршрути на МРП через мережеві шлюзи. МРП коригують свої маршрути в реальному часі відповідно до нових даних. Центральна система постійно моніторить стан МРП та умови виробництва, вносячи корективи до маршрутів у разі змін. Через інтерфейси для операторів дозволяють отримувати інформацію про стан МРП, маршрути та загальний стан системи в реальному часі. Оптимізація маршрутів дозволяє знизити час доставки матеріалів та продукції, підвищуючи загальну продуктивність підприємства. Уникаючи перешкод та враховуючи місцезнаходження персоналу, система підвищує безпеку виробничих процесів. Система здатна швидко адаптуватися до змін у виробничих умовах, забезпечуючи постійну оптимізацію маршрутів МРП.

### ІАСУ з федеративним навчанням на основі розподіленої системи збору інформації з ІоЕ для оптимізації маршрутів МРП в Індустрії 5.0

Наведемо приклади ІАСУ на основі розподіленої системи збору інформації з ІоЕ для оптимізації маршрутів МРП в Індустрії 5.0. Така система включає розподілені системи збору інформації з ІоЕ [11, 12] та використання федеративного навчання (ФН) [13, 14] для підвищення безпеки та ефективності. Вона включає додаткові ІоЕ пристрої: температурні сенсори для підтримки оптимальних умов роботи, вологості для контролю рівня вологості для забезпечення безпеки та якості продукції, сенсори світла для моніторингу освітленості та забезпечення комфортних умов роботи.

На рис.4 представлена схема федеративного навчання ІАСУ в Індустрії 5.0

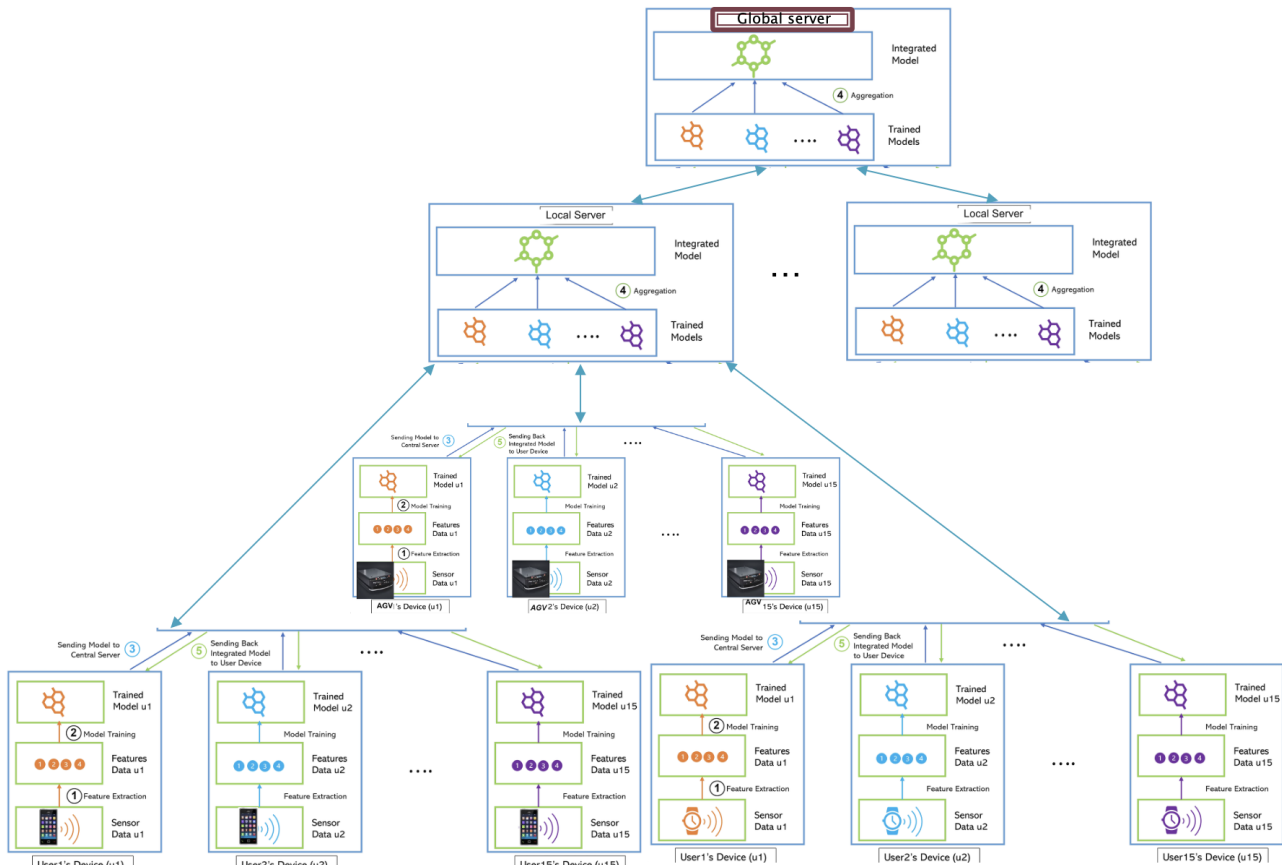


Рис.4. Схема федеративного навчання ІАСУ в Індустрії 5.0

ФН дозволяє створювати моделі машинного навчання, використовуючи дані, що залишаються на пристроях. Це забезпечує конфіденційність даних, оскільки вони не передаються в центр обробки. Воно використовується для розподіленого аналізу даних без централізованого зберігання, що забезпечує

конфіденційність і безпеку. Централізована платформа для зберігання та обробки даних, використання алгоритмів машинного навчання та оптимізації.

Загалом процес ФН можна розбити на такі кроки:

Крок 1. Налаштування та ініціалізація. Центральний сервер керує процесом ФН. Він зберігає початкову архітектуру моделі та розповсюджує оновлення. Граничні пристрої/клієнти — це окремі пристрої, які зберігають локальні дані та беруть участь у процесі навчання. Центральний сервер створює початкову модель і надсилає її на всі периферійні пристрої.

Крок 2. Локальне навчання. Кожен крайовий пристрій навчає модель, отриману від сервера FL, використовуючи власні локальні дані. Процес навчання може включати кілька ітерацій або епох для покращення продуктивності моделі.

Крок 3. Оновлення моделі. Після локального навчання кожен периферійний пристрій генерує оновлення моделі, яке, по суті, складається зі змін ваги, які відображають те, що пристрій навчився зі своїх локальних даних. Однак фактичні дані залишаються на периферійному пристрої й не передаються.

Крок 4. Агрегація моделей і глобальне оновлення. Периферійні пристрої надсилають свої оновлення моделей назад на центральний сервер. Центральний сервер збирає ці оновлення за допомогою таких методів, як усереднення або зважене усереднення. Це створює глобальне оновлення моделі, яке включає знання з усіх периферійних пристроїв без розкриття їхніх індивідуальних даних. Центральний сервер застосовує агреговане оновлення моделі до глобальної моделі, підвищуючи її продуктивність за рахунок використання колективних знань периферійних пристроїв.

Дані з сенсорів попередньо обробляються на місці для швидкого реагування на зміни в реальному часі. Далі дані передаються до хмарної платформи для централізованої обробки, використання алгоритмів машинного навчання та аналізу. Дані від всіх сенсорів збирають та зберігають у хмарній базі даних Azure, використовуючи: Azure IoT Hub, який приймає дані від усіх IoT пристроїв та Azure Blob Storage або Azure Data Lake для зберігання великих обсягів даних для подальшого аналізу. Обробку та Аналіз Даних можна здійснювати на Azure Stream Analytics у реальному часі. Azure Machine Learning використовують у ФН для створення моделей, що зберігають конфіденційність даних. Azure Synapse Analytics застосовують для комплексного аналізу великих обсягів даних. Алгоритми машинного навчання аналізують дані з сенсорів, МРП та портативних пристроїв (смарт годинників і смартфонів) для визначення їх оптимальних маршрутів. Враховуються поточні та прогнозовані умови, такі як завантаженість маршрутів, наявність перешкод, активність персоналу та стан обладнання. Візуалізацію та моніторинг доцільно здійснювати за допомогою Power BI у реальному часі. Моніторинг продуктивності та здоров'я системи проводять в Azure Monitor. Оптимізовані маршрути передаються на МРП та інші системи управління МРП через мережеві шлюзи. Системи коригують свої дії в реальному часі відповідно до нових даних. Система управління постійно моніторить стан МРП, маршрути та умови виробництва, вносячи корективи до маршрутів у разі змін. Оптимізація маршрутів дозволяє знизити час доставки матеріалів та продукції, підвищуючи загальну продуктивність підприємства. Врахування місцезнаходження та діяльності персоналу, стану обладнання та умов навколишнього середовища підвищує безпеку виробничих процесів. Система здатна швидко адаптуватися до змін у виробничих умовах, забезпечуючи постійну оптимізацію маршрутів та планування МРП. Для матеріально-ресурсного планування доцільно інтегрувати дані з усіх джерел, приймає оптимальні рішення щодо маршрутів МРП. Також розробити інтерфейси для операторів і працівників, що дозволяють отримувати інформацію про стан МРП, маршрути та загальний стан системи в реальному часі.

У людино-центричній Індустрії 5.0 використання розподілених систем збору та аналізу інформації, а також федеративного навчання, реалізованих в ІАСУ, забезпечує швидку адаптацію до змін ринкових умов і вимог. Це дозволяє підприємствам оперативно реагувати на нові виклики та впроваджувати інновації. Оптимізація маршрутів МРП за допомогою ІАСУ з федеративним навчанням та розподіленими системами збору інформації сприяє зниженню витрат на енергію та інші ресурси. ІАСУ забезпечують більш ефективний моніторинг та контроль виробничих процесів, а також колаборативну співпрацю і допомогу виробничому персоналу. Це дозволяє оперативно виявляти та усувати недоліки, зменшуючи час простоїв та підвищуючи ефективність виробництва.

Проведене в даній статті дослідження сприяє розробці нових підходів та технологій для Індустрії 5.0, що забезпечують подальший розвиток промислових підприємств. Це дозволяє їм залишатися конкурентоспроможними на глобальному ринку та впроваджувати передові технологічні рішення.

### **ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ**

Проаналізувавши існуючі технології Індустрії 5.0 виявлено, що інтеграція штучного інтелекту, машинного навчання та блокчейну, стикаються з обмеженнями, такими як вимоги до високоякісних даних, значні обчислювальні ресурси, проблеми з масштабованістю, безпекою та конфіденційністю. Крім того, обчислення на краю та квантові обчислення мають технічні та економічні виклики, які потребують додаткових досліджень та інноваційних рішень для ефективного впровадження.



Згідно проведеного аналізу сформульовано особливості етапів розробки ІАСУ для Індустрії 4.0 та 5.0 які включають: стратегічне планування, вибір технологічної платформи, розробка концепції системи, впровадження та інтеграція технологій, тестування та налагодження, навчання персоналу, а також постійну оптимізацію та підтримку системи. Цей комплексний підхід забезпечує адаптивність та гнучкість виробничих процесів, дозволяючи підприємствам швидко реагувати на зміни ринкових умов та технологічного середовища.

У Індустрії 4.0 ІАСУ які використовують МРП забезпечують збір даних з IoT та IIoT пристроїв, що дозволяє оптимізувати виробничі процеси. У Індустрії 5.0 використовуються технології ІоЕ та федеративного навчання для покращення адаптивності та безпеки, забезпечують більш індивідуалізований підхід до виробництва та підвищення задоволеності клієнтів. Така ІАСУ дозволяє збирати та аналізувати дані локально, що підвищує безпеку та конфіденційність. Федеративне навчання забезпечує оптимізацію маршрутів МРП без необхідності централізованого зберігання даних, що зменшує ризики втрати чи компрометації інформації та підвищує ефективність виробничих процесів.

Подальші дослідження будуть зосереджені на розробці нових методів інтеграції та оптимізації ІАСУ з використанням передових технологій: Digital twins та Cloud-supply. А також розробці нових моделей машинного навчання на базі Federated Learning Framework для бібліотеки TensorFlow Federated мовою python. Важливим етапом є розробка та забезпечення сумісності і інтеграції різних технологій в рамках Індустрії 5.0, включаючи розробку стандартів та методів для їх ефективного впровадження.

Розробка інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень вимагає забезпечення гнучкості та індивідуалізації виробництва з урахуванням змінних вимог ринку та умов виробництва. А саме розвиток інтерактивних середовищ, які сприяють співпраці між людьми та автоматизованими системами, зокрема шляхом розробки інтерфейсів та платформ для ефективної взаємодії. Тому також необхідно досліджувати етичні та соціальні питання, пов'язані з використанням штучного інтелекту, великих даних та автоматизованих систем у виробничих процесах, зокрема розробляти стратегії для їх вирішення.

#### Література

1. European Union. Industry 4.0. Digitalisation for Productivity and Growth . European Union, 2015.
2. Nahavandi, Saeid. "Industry 5.0—A Human-Centric Solution." Sustainability 11.16 (2019): 4371.
3. Skobelev, P. O., and S. Yu Borovik. "On the Way from Industry 4.0 to Industry 5.0: From Digital Manufacturing to Digital Society." Industry 4.0 2.6 (2017): 307-311.
4. КРАУС Н.М., КРАУС К.М. "Які зміни несе в соаі «індустрія 4.0» для економіки та виробництва?" [Електронний ресурс] / <https://core.ac.uk/download/pdf/185261759.pdf>
5. Golovianko, Mariia, Vagan Terziyan, Vladyslav Branytskyi, and Diana Malyk. "Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-Existence, Transition, or a Hybrid." Procedia Computer Science , vol. 217, 2023, pp. 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.206>.
6. Suntsova, Olesia. "Econometric and Digital Business Transformation in Industry 4.0 and 5.0 Concepts." Financial and Credit Systems: Prospects for Development , no. 2, Aug. 2022, pp. 36-47. <https://doi.org/10.26565/2786-4995-2022-2-04>.
7. Kraus, K., N. Kraus, and O. Shtepa. "Industry X.0 and Industry 4.0 in the Conditions of Digital Transformation and Innovative Strategy of the Development of National Economy." Efektyvna Ekonomika , no. 5, May 2021. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021.5.91>.
8. Figueiredo Do Nascimento, S., A. Roque Mendes Polvora, and J. Sousa Lourenco. "#Blockchain4EU: Blockchain for Industrial Transformations." Publications Office of the European Union , 2018. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC111095>.
9. General Data Protection Regulation GDPR [Електронний ресурс]. <https://gdpr-info.eu/>
10. Higginbotham, S. "What 5G Hype Gets Wrong-[Internet of Everything]." IEEE Spectrum vol. 57, no. 3, 2020, p. 22.
11. Pavliuk, Olena, Rafal Cupek, Tomasz Steclik, Mykola Medykovskyy, and Marek Drewniak. "A Novel Methodology Based on a Deep Neural Network and Data Mining for Predicting the Segmental Voltage Drop in Automated Guided Vehicle Battery Cells." Electronics , vol. 12, no. 22, Nov. 2023, p. 4636. <https://doi.org/10.3390/electronics12224636>.
12. Pavliuk, Olena, Myroslav Mishchuk, and Christine Strauss. "Transfer Learning Approach for Human Activity Recognition Based on Continuous Wavelet Transform." Algorithms , vol. 16, no. 2, Feb. 2023, p. 77. <https://doi.org/10.3390/a16020077>.
13. Shubyn, B., D. Kostrzewa, P. Grzesik, P. Benecki, T. Maksymyuk, V. Sunderam, J.H. Syu, and J.C.W. Lin. "Federated Learning for Improved Prediction of Failures in Autonomous Guided Vehicles." Journal of Computational Science , 2023, 101956. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2023.101956>.

14. Shubyn, B., D. Mrozek, T. Maksymyuk, V.S. Sunderam, D. Kostrzewa, and P. Grzesik. "Federated Learning for Anomaly Detection in Industrial IoT-Enabled Production Environment Supported by Autonomous Guided Vehicles." In: Groen, D., de Mulatier, C., Paszynski, M., Krzhizhanovskaya, V.V., Dongarra, J.J., Sloot, P.M.A. (eds) Computational Science – ICCS 2022. Lecture Notes in Computer Science , vol. 13353. Springer, Cham, 2022, pp. 409-421.

### References

1. European Union. Industry 4.0. Digitalisation for Productivity and Growth . European Union, 2015.
2. Nahavandi, Saeid. "Industry 5.0—A Human-Centric Solution." Sustainability 11.16 (2019): 4371.
3. Skobelev, P. O., and S. Yu Borovik. "On the Way from Industry 4.0 to Industry 5.0: From Digital Manufacturing to Digital Society." Industry 4.0 2.6 (2017): 307-311.
4. Kraus, N. M., and K. M. Kraus. "Які Зміни Несе в Соції «Індустрія 4.0» для Економіки та Виробництва?" [Електронний ресурс] Core . <https://core.ac.uk/download/pdf/185261759.pdf>
5. Golovianko, Mariia, Vagan Terziyan, Vladyslav Branytskyi, and Diana Malyk. "Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-Existence, Transition, or a Hybrid." Procedia Computer Science , vol. 217, 2023, pp. 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.206>.
6. Suntsova, Olesia. "Econometric and Digital Business Transformation in Industry 4.0 and 5.0 Concepts." Financial and Credit Systems: Prospects for Development , no. 2, Aug. 2022, pp. 36-47. <https://doi.org/10.26565/2786-4995-2022-2-04>.
7. Kraus, K., N. Kraus, and O. Shtepa. "Industry X.0 and Industry 4.0 in the Conditions of Digital Transformation and Innovative Strategy of the Development of National Economy." Efektyvna Ekonomika , no. 5, May 2021. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021.5.91>.
8. Figueiredo Do Nascimento, S., A. Roque Mendes Polvora, and J. Sousa Lourenco. "#Blockchain4EU: Blockchain for Industrial Transformations." Publications Office of the European Union , 2018. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC111095>.
9. General Data Protection Regulation GDPR [Електронний ресурс]. <https://gdpr-info.eu/>
10. Higginbotham, S. "What 5G Hype Gets Wrong-[Internet of Everything]." IEEE Spectrum vol. 57, no. 3, 2020, p. 22.
11. Pavliuk, Olena, Rafal Cupek, Tomasz Steclik, Mykola Medykovskyy, and Marek Drewniak. "A Novel Methodology Based on a Deep Neural Network and Data Mining for Predicting the Segmental Voltage Drop in Automated Guided Vehicle Battery Cells." Electronics , vol. 12, no. 22, Nov. 2023, p. 4636. <https://doi.org/10.3390/electronics12224636>.
12. Pavliuk, Olena, Myroslav Mishchuk, and Christine Strauss. "Transfer Learning Approach for Human Activity Recognition Based on Continuous Wavelet Transform." Algorithms , vol. 16, no. 2, Feb. 2023, p. 77. <https://doi.org/10.3390/a16020077>.
13. Shubyn, B., D. Kostrzewa, P. Grzesik, P. Benecki, T. Maksymyuk, V. Sunderam, J.H. Syu, and J.C.W. Lin. "Federated Learning for Improved Prediction of Failures in Autonomous Guided Vehicles." Journal of Computational Science , 2023, 101956. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2023.101956>.
14. Shubyn, B., D. Mrozek, T. Maksymyuk, V.S. Sunderam, D. Kostrzewa, and P. Grzesik. "Federated Learning for Anomaly Detection in Industrial IoT-Enabled Production Environment Supported by Autonomous Guided Vehicles." In: Groen, D., de Mulatier, C., Paszynski, M., Krzhizhanovskaya, V.V., Dongarra, J.J., Sloot, P.M.A. (eds) Computational Science – ICCS 2022. Lecture Notes in Computer Science , vol. 13353. Springer, Cham, 2022, pp. 409-421.