

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних наук
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Аналіз кіберфізичних систем для промислових IoT-застосунків
Індустрії 4.0

Виконав: студент IV курсу, групи СНС-42
спеціальності 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва спеціальності)

Руснак В.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Станько А.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Консультант Дуда О.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Марценко С.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Боднарчук І.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Голотенко О.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних наук
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Боднарчук І.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 29 » червня 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Руснак Вадім Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз кіберфізичних систем для промислових IoT-застосунків Індустрії 4.0

Керівник роботи Станько Андрій Андрійович, доктор філософії, асистент кафедри КН
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 29 » квітня 2024 року № 4/7-472

2. Термін подання студентом завершеної роботи 24 червня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи Аналіз кіберфізичні системи для промислових IoT-застосунків Індустрії 4.0

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1 Аналіз предметної області кіберфізичних систем та Індустрії 4.0. 1.1 Аналіз елементів кіберфізичних систем. 1.2 Пов'язані роботи. 1.3 Стан досліджень КФС Індустрії 4.0. 1.4 Методологія дослідження. 1.5 Висновок до першого розділу. 2 Проектна частина. Периферійні і хмарні сервіси промислового IoT. 2.1 Промислові виробничі системи. 2.2 Моніторинг виробництва. 2.3 Короткий огляд вимог IIoT. 2.4 Архітектура платформи IIoT. 2.5 Висновок до другого розділу. 3 Практична частина. Категоризація кіберфізичних систем в контексті Індустрії 4.0. 3.1 Кіберфізичні системи в Індустрії 4.0. 3.2 Результати аналізу КФС. 3.3 Інтеграція суміжних служб. 3.4 Граничні шлюзи та програмне забезпечення. 3.5 Периферійні пристрої та виміри. 3.6 Висновок до третього розділу. 4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці. Висновки. Перелік джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу

1 Титульна сторінка. 2 Тема, Мета, Об'єкт, Предмет дослідження. 3 Завдання дослідження. 4 Актуальність дослідження. 5 Схема функціонування промислової КФС. 6 Процес систематичного перегляду літератури. 7 Архітектурна концепція для створення застосунків. 8 Характеристики промислових КФС. 9 Доповнення концепцій і технологій для промислових КФС. 10 Архітектура промислових КФС. 11 Динамічна оркестрація послуг ANF 12 Висновки. 13 Завершальний.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Сенчишин В.С.	12.06.2024	15.06.2024

7. Дата видачі завдання 29 січня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Руснак В.М

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Станько А.А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Аналіз кіберфізичних систем для промислових IoT-застосунків Індустрії 4.0 // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Бакалавр» // Руснак Вадім Михайлович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СНс-42 // Тернопіль, 2024 // С.69 , рис. – 5, табл. – 1, кресл. – 13, додат. – 2, бібліогр. – 59.

Ключові слова: кіберфізичні системи, індустрія 4.0, ІоТ, хмарні обчислення, моніторинг, автоматизація, великі дані.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню кіберфізичних систем для промислових IoT-застосунків Індустрії 4.0.

В першому розділі кваліфікаційної роботи описано предметну область кіберфізичних систем та Індустрії 4.0. Висвітлено стан досліджень КФС Індустрії 4.0. Розглянуто методологію дослідження.

В другому розділі кваліфікаційної роботи досліджено периферійні і хмарні сервіси промислового ІоТ. Подано особливості моніторингу виробництва, архітектуру платформ ІоТ.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи проаналізовано категоризацію кіберфізичних систем в контексті Індустрії 4.0. Проведено опис інтеграції суміжних служб, периферійних пристроїв та вимірів.

В четвертому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто забезпечення безпечної роботи з обладнанням.

Об'єкт дослідження: кіберфізичні системи, що застосовуються у промислових IoT-застосунках в рамках Індустрії 4.0.

Предмет дослідження: концептуальні підходи, архітектурні рішення та практичні аспекти впровадження кіберфізичних систем у промислових IoT-застосунках для досягнення цілей Індустрії 4.0.

ANNOTATION

Analysis of Cyber-Physical Systems for Industrial IoT Applications of Industry 4.0 // Qualification work of the educational level «Bachelor» // Rusnak Vadim Mykhailovych // Ternopil Ivan Pulyu National Technical University, Computer and Information Systems and Software Engineering Faculty, Computer Sciences Department, group SNs-41 // Ternopil, 2024 // P.69, fig. – 5, tabl. – 1, chair. – 13, annexes. – 2, references – 59.

Keywords: cyber-physical systems, Industry 4.0, IIoT, cloud computing, monitoring, automation, big data.

The qualification work is devoted to the study of cyber-physical systems for industrial IoT applications of Industry 4.0

The first chapter of the qualification work describes the subject area of cyber-physical systems and Industry 4.0. The state of research on CPS of Industry 4.0 is highlighted. The research methodology is considered.

The second chapter of the qualification work investigates the peripheral and cloud services of industrial IoT. The features of production monitoring and the architecture of IIoT platforms are presented.

The third chapter of the qualification work analyzes the categorization of cyber-physical systems in the context of Industry 4.0. The integration of related services, peripherals, and measurements is described.

The fourth chapter of the qualification work considers ensuring safe operation of the equipment.

Object of study: cyber-physical systems used in industrial IoT applications within the framework of Industry 4.0.

Subject of research: conceptual approaches, architectural solutions and practical aspects of implementing cyber-physical systems in industrial IoT applications to achieve the goals of Industry 4.0.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ШІ – Штучний інтелект.

МН – Машинне навчання.

QoS – (англ. Quality of Service) – Якість обслуговування.

API – (англ. Application Programming Interface) – Інтерфейс програмування застосунків.

DaaS – (англ. Data as a Service) – Дані як послуга.

ШІ – Штучний інтелект.

DSU – (англ. Data Storage Unit) – Пристрій зберігання даних.

ПЛІС – Програмовані логічні інтегральні схеми.

RFID – (англ. Radio Frequency Identification) – Радіочастотна ідентифікація.

HCI – (англ. Human-Computer Interaction) – Взаємодія людина-комп'ютер.

SoS – (англ. System of Systems) – Система систем.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ ТА ІНДУСТРІЇ 4.0	10
1.1 Аналіз елементів кіберфізичних систем	10
1.2 Пов’язані роботи.....	13
1.3 Стан досліджень КФС Індустрії 4.0	15
1.4 Методологія дослідження.....	15
1.5 Висновок до першого розділу	18
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТНА ЧАСТИНА. ПЕРИФЕРІЙНІ І ХМАРНІ СЕРВІСИ ПРОМИСЛОВОГО ІОТ	20
2.1 Промислові виробничі системи	20
2.2 Моніторинг виробництва.....	22
2.3 Короткий огляд вимог ІоТ.....	23
2.4 Архітектура платформи ІоТ	24
2.5 Висновок до другого розділу	27
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА. КАТЕГОРИЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ В КОНТЕКСТІ ІНДУСТРІЇ 4.0	28
3.1 Кіберфізичні системи в Індустрії 4.0	28
3.2 Результати аналізу КФС	44
3.3 Інтеграція суміжних служб	46
3.4 Граничні шлюзи та програмне забезпечення	48
3.5 Периферійні пристрої та виміри	49
3.6 Висновок до третього розділу	50
РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	51
4.1 Питання щодо безпеки життєдіяльності	51
4.2 Питання з основ охорони праці	56
4.3 Висновок до четвертого розділу	60

ВИСНОВКИ.....	62
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ.....	64
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність теми КФС у контексті Індустрії 4.0 полягає у зростаючій потребі в інтеграції фізичних та цифрових технологій для оптимізації промислових процесів. КФС відіграють ключову роль у «розумному» виробництві, забезпечуючи зв'язок між реальними об'єктами та комп'ютерними системами, що дозволяє підвищити ефективність, гнучкість та безпеку виробничих процесів.

З огляду на швидкий розвиток технологій та економіки, актуальність КФС посилюється їхньою здатністю адаптуватися до змінних умов ринку, включно з персоналізацією продукції та оптимізацією ланцюгів постачання. Крім того, інтеграція інноваційних КФС сприяє залученню передових практик управління даними, штучного інтелекту та машинного навчання, що відкриває нові можливості для створення вартості та підвищення конкурентоспроможності підприємств.

Також, розвиток КФС має значний соціальний вплив, оскільки ці системи здатні підтримувати стале виробництво, зменшувати екологічний вплив та підвищувати безпеку роботи, що є критично важливим у контексті глобальних викликів сучасності.

Мета і задачі дослідження. Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр» є підвищення є всебічний аналіз і оцінка кіберфізичних систем (КФС) для промислових IoT-застосунків в рамках Індустрії 4.0. Для досягнення цієї мети було визначено кілька основних задач: огляд концепції КФС та їх ролі в сучасній промисловості; аналіз промислових прикладів використання КФС і оцінка їх ефективності; розробка концептуальної архітектури для забезпечення інтероперабельності і динамічної конфігурації хмарних сервісів; оцінка функціональності КФС та викликів, з якими стикаються підприємства при їх впровадженні; а також розробка рекомендацій щодо оптимізації використання КФС та визначення перспектив

подальших досліджень у цій сфері. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань, зокрема:

- Проаналізувати стан досліджень КФС Індустрії 4.0
- Дослідити існуючі промислові виробничі системи.
- Проаналізувати архітектуру платформ ІоТ.
- Виконати порівняння інструментів та методів оцінок кіберзагроз.
- Розробити категоризацію кіберфізичних систем в контексті Індустрії

4.0

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження мають значне практичне значення для промислових підприємств, що прагнуть інтегрувати кіберфізичні системи (КФС) у свої виробничі процеси в рамках Індустрії 4.0. Одержані висновки та рекомендації сприятимуть підвищенню ефективності та адаптивності виробничих систем шляхом оптимізації процесів моніторингу та управління в реальному часі. Розроблена концептуальна архітектура забезпечить інтероперабельність і динамічну конфігурацію хмарних сервісів, що дозволить підприємствам знизити витрати на передачу даних і покращити обробку великих обсягів інформації. Крім того, вирішення питань інтеграції та стандартизації сприятиме більш ефективному впровадженню КФС, що, в свою чергу, підвищить стабільність і продуктивність виробничих операцій, відкриваючи нові можливості для інновацій і стратегічного розвитку.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ ТА ІНДУСТРІЇ 4.0

1.1 Аналіз елементів кіберфізичних систем

Термін кіберфізичні системи (КФС) був введений Е. А. Лі у 2006 році; відтоді напрямок досліджень отримав подальший аналіз і розвиток у кількох наукових і практичних дисциплінах [1]. КФС – це вбудовані системи, які мають як кібернетичну, так і фізичну сферу, між якими відбувається безперервний та ітеративний обмін інформацією [2]. У фізичній сфері датчики використовуються для реєстрації умов навколишнього середовища, які потім оцінюються в кіберсфері з використанням локальних обчислювальних потужностей. Інформація, отримана з потоку даних, може або обмінюватися з іншими суб'єктами через комунікаційні інтерфейси, або використовуватися у фізичній сфері для впливу на навколишнє середовище відповідно до заздалегідь визначених правил поведінки за допомогою виконавчих механізмів. Таким чином, КФС можна використовувати для моніторингу, а також для управління цифровими, фізичними і особливо гібридними процесами [3]. Постійна мініатюризація комп'ютерного обладнання в поєднанні з постійним зниженням вартості компонентів дозволяє широко використовувати КФС в широкому діапазоні контекстів і умов [4] та працювати повністю автономно і в взаємодії з людиною [5].

При проектуванні, розробці та експлуатації КФС необхідно враховувати три аспекти: технічний, людський/соціальний та організаційний [6]. Що стосується технічного аспекту, то апаратне та програмне забезпечення, що відповідає конкретній програмі та вимогам, має бути об'єднане з відповідною архітектурою. Крім того, КФС має бути інтегрована в існуючу фізичну і цифрову інфраструктуру, а бажана інтероперабельність з іншими системами [7] має бути забезпечена за допомогою норм і стандартів [8]. Людський/соціальний

вимір охоплює інтеграцію людини в КФС або взаємодію людини з КФС. У цьому вимірі важливе значення має безпека використання та врахування етичних питань при розробці системи [9].

Крім того, КФС можна розділити на три рівні, які класифікують їх застосування з точки зору розміру системи та охоплення. На мікрорівні використовуються в індивідуальному контексті або в малих групах, як правило, обмежуючись місцевою територією. На більшому рівні застосування КФС здійснюється в масштабах всієї організації і може мати міжрегіональні системні масштаби. На макрорівні розгортаються, часто як нестабільні системи систем [10], у сценаріях застосування, які охоплюють цілі національні економіки або є ще більш масштабними і розробляються на трансрегіональному або глобальному рівні. У межах цих рівнів, в контексті цифрової трансформації, КФС використовуються в різних сферах. До них належать міський розвиток, охорона здоров'я, мобільність, управління будівлями і створення промислової вартості [11]. Як зазначалося, завдяки такому широкому спектру застосувань на різних рівнях і в різних галузях, КФС кваліфікуються як технологія загального призначення [12]. Відмінною характеристикою технологій такого роду є те, що вони можуть використовуватися широко і міжфункціонально з високим рівнем корисності. Як і попередні технології загального призначення, такі як паровий двигун, конвеєри або комп'ютери, КФС, у поєднанні з іншими технологіями цифрової епохи, мають потенціал вивільнити сплеск продуктивності, який може спричинити промислову революцію [13]. З цієї причини цифрову трансформацію створення промислової цінності за допомогою КФС обговорюють під загальним терміном «Індустрія 4.0» [14], який передбачає ці далекосяжні зміни. Серед іншого, вважається, що створення КФС має потенціал для вирішення таких ринкових мегатенденцій, як посилення індивідуалізації, дематеріалізації та сервітизації, а також підвищення стійкості шляхом оптимізації існуючих процесів і результатів та впровадження нових інновацій.

КФС, що використовуються в промисловій сфері, називаються промисловими КФС [15]. Цей термін використовується в широкому сенсі і

охоплює не лише КФС, що використовуються у виробництві, а й периферійні, наприклад, у «розумних» продуктах, які надають відповідні дані для створення цінності. Таким чином, промислові КФС ширші за обсягом, ніж кіберфізичні виробничі системи (CPPS) [16]. Схематично функціонування промислової КФС, яка показана на рисунку 1.1, можна описати наступним чином: У фізичній сфері дані про стан збираються протягом усього циклу виробництва та життєвого циклу продукції. Це включає «розумні» (сировинні) матеріали/компоненти на стадії передвиробництва, а згодом – «розумні» продукти на стадії використання продукту. Записані дані потім використовуються в кіберсфері двома способами. По–перше, в режимі реального часу для моніторингу та контролю станів і процесів. Порогові значення та алгоритми використовуються для виявлення (неминучих) подій, щоб реагувати таким чином, що відповідні виконавчі механізми спрацьовують у фізичній сфері згідно з попередньо визначеною системною логікою [18]. По–друге, зібрані дані обробляються та агрегуються у вигляді цифрового двійника для виробничих підприємств та (суб)продуктів у довгостроковій перспективі [19]. Крім того, величезні масиви даних, що постійно зростають, аналізуються за допомогою аналітики великих даних [20]. Отримані таким чином знання потім використовуються для оптимізації методів моніторингу та контролю в режимі реального часу, тим самим постійно підвищуючи продуктивність промислової КФС. Виходячи з цієї схеми, промислові КФС є основою для великої кількості випадків використання в Індустрії 4.0, включаючи прогнозоване технічне обслуговування [21], планування розміру замовлень і партій, управління енергією [22], запобігання катастрофам і контроль якості, серед інших.



Рисунок 1.1 – Схема функціонування промислової КФС.

1.2 Пов'язані роботи

Як і слід було очікувати від широко розповсюдженої технології загального призначення, тематика КФС у промислових IoT–застосунках вже є всеохопною. Літературу, яка має відношення до цього дослідження як супутня робота у вигляді оглядів або систематизацій на тему КФС, можна розділити на загальну, тематичну та галузеву перспективи.

В рамках загального огляду автори в [23] розглянули і проаналізували теоретичні засади КФС. В іншому загальному огляді [24], присвяченому КФС, висвітлили системну інтеграцію, архітектуру та виклики, пов'язані з КФС. Використовуючи менш теоретичну орієнтацію, автори в [25] представили методи і застосунки для проектування, моделювання, імітації та інтеграції КФС. До цих тем примикає систематичний огляд інтероперабельності та інтеграції, проведений авторами в [26]. Окрім згаданих вище публікацій, які підходять до теми КФС з широкої точки зору, існують також огляди, такі як огляд [27], присвячений самоадаптації систем, в яких КФС розглядається в цілому, але виключно з точки зору однієї характеристики.

Тематичні дослідження зосереджені на спеціальних застосуваннях, технологіях або доменах, пов'язаних з КФС. Загальний огляд можливих застосувань наведено в огляді [28]. У цьому дослідженні описано та проаналізовано десять сфер застосування. Огляд безпеки КФС, проведений [29], є прикладом оглядів, що зосереджуються виключно на одній сфері

застосування. Інші огляди, такі як огляди блокчейн–інфраструктури КФС [30] або хмарних технологій КФС [31], зосереджуються на технологіях та їх інтегрований роботі з КФС. Існують також спеціальні огляди, присвячені використанню КФС у конкретних галузях, як, наприклад, огляд [32], присвячений охороні здоров'я.

Існує також широкий спектр попередніх робіт у сфері Індустрії 4.0. Наприклад, у своєму огляді літератури [33] розглянули загальні виклики, підходи та методи, що застосовуються у виробництві в рамках КФС. Проаналізовано зв'язок КФС з додатковими концепціями та технологіями, такими як інтернет речей (IoT), великі дані та хмарні обчислення, в контексті створення цінності в цифровій промисловості [34]. Питання стандартів інтероперабельності для забезпечення взаємозв'язку між цими технологіями та пристроями, що їх використовують, було розглянуто в огляді [35]. Крім того, систематичне картографічне дослідження архітектур, технологій та викликів для КФС в Індустрії 4.0 було проведене авторами в [36]. Подальші статті, присвячені архітектурам КФС для виробництва, були розглянуті в [37], ці огляди привернули особливу увагу до застосувань, пов'язаних з промисловим інтернетом речей. В інших оглядах досліджувалися характеристики КФС в контексті «розумних» заводів [38] і «розумного» виробництва [39]. Тема розумного виробництва, зокрема контроль його процесів, також розглядалася в огляді літератури [40]. Процес проектування КФС для виробництва був проаналізований в огляді літератури [41] де автори представили принципи проектування для сценаріїв Індустрії 4.0. Загальний огляд сучасного стану справ на тему Індустрії 4.0 з додатковим поглядом на майбутні тенденції надали. На додаток до аналітичних досліджень та оглядів, згаданих вище, існують також дослідження промислових КФС, які представляють концепції, що структурують тематичні напрямки в різних формах.

1.3 Стан досліджень КФС Індустрії 4.0

Розподіл публікацій за дисциплінами, показує, що з точки зору виміру КФС, технічні дисципліни є найбільшими. З огляду на публікації в організаційних і в соціотехнічних дисциплінах, очевидно, що тема КФС досі розглядалася переважно з технічної точки зору і з точки зору проектування систем, тоді як організаційне застосування і системна інтеграція людей до цього часу представляли незначний інтерес.

Розглядаючи розподіл публікацій, які можна віднести до певної прикладної області (явне застосування описується стосовно лише однієї області), стає очевидною більша різноманітність. Чотири сфери, на які припадає понад 10% усіх публікацій, стосуються мобільності, виробництва, енергетики та охорони здоров'я. Із огляду публікацій отримуємо, що публікацій, присвячених виробництву, енергетиці, логістиці, робототехніці, безпеці та захисту від небезпек, технічному обслуговуванню, «розумним» продуктам, а також вугільній, нафтовій і газовій промисловості, більше половини тематичних публікацій мають відношення до промислового використання.

1.4 Методологія дослідження

Для досягнення дослідницьких цілей цього дослідження обрано наступний напрямок дослідження: проведено комплексний систематичний огляд літератури для збору даних. Отриманий масив даних було проаналізовано та перетворено у стан знань про дослідження та категоризацію тем, пов'язаних з КФС та актуальних в контексті Індустрії 4.0. В якості джерел були обрані індексуєчі сервіси та бази даних, що зображено на рисунку 1.2. Стан досліджень про КФС, так і категоризація пов'язаних з ЦПС та актуальних тем у контексті Індустрії 4.0 мають на меті забезпечити всебічний, загальний та

цілісний огляд предметної області. Тому літературний пошук також є всебічним, щоб включити якомога більше відповідних публікацій.

Для збору та аналізу даних було обрано систематичний огляд літератури через його прозорість, вичерпність та евристичність. У систематичному огляді літератури локалізуються, оцінюються та інтерпретуються наукові дослідження на певну тему. Він відрізняється від традиційного наративного огляду своєю методологічною стратегією і детальним описом кожного окремого кроку процесу. Крім того, він спрямований на мінімізацію упередженості та підвищення відтворюваності і прозорості підходів, рішень і висновків дослідників. В Таблиці 1.1 описано п'ять основних етапів систематичного огляду літератури.

На першому етапі були визначені дві цілі дослідження відповідно до мотивації цього дослідження: Перша мета – описати та проаналізувати стан досліджень у сфері КФС, а друга – розробити і представити категоризацію тем, актуальних в контексті Індустрії 4.0.

Другий крок полягав у визначенні релевантної літератури, необхідної для досягнення визначених цілей дослідження, що включав скринінг, відбір та оцінку результатів пошуку. Для пошуку були обрані онлайн-бази даних та бібліотечні сервіси EBSCO, Emerald Insight, Google Scholar, SAGE Journals, Science Direct та Springer Link, щоб охопити всі відповідні предметні області. Функція розширеного пошуку була використана в усіх базах даних для більш повних можливостей пошуку. Ключові слова базувалися на терміні «кіберфізичні системи», враховуючи різні варіанти написання в існуючій літературі. Були використані як синоніми, так і форми множини для забезпечення вичерпного пошуку, а також всебічних і достовірних результатів. Ключові слова та їхні синоніми були об'єднані в пошукові рядки за допомогою булевих операторів.

На третьому етапі результати пошуку були переглянуті та відібрані на основі визначених критеріїв включення та виключення. Критеріями включення були наявність ключових слів або синонімів та відповідність темі дослідження.

КФС виникають в результаті поєднання декількох апаратних і програмних компонентів, спираються на складну архітектуру і багаторівневі стандарти зв'язку, а також залучають різні зацікавлені сторони [42]. По-друге, сфера створення промислової вартості, в основі якої лежить виробництво, взаємопов'язана з багатьма іншими сферами, такими як логістика та енергопостачання, які містять багато сценаріїв застосування КФС. По-третє, оскільки сфера дослідження РВБ є дуже актуальною, результати, отримані в конкретних нішах, можуть мати універсальне значення, що стосується й інших дослідницьких дисциплін.

На четвертому етапі відібрані матеріали були проаналізовані з метою вилучення та узагальнення відповідних даних.

Якісний контент-аналіз проводився, щоб забезпечити спільне і послідовне розуміння і процедуру. Результати порівнювалися та коригувалися до досягнення спільного консенсусу. Для забезпечення якості, щоб запобігти потенційній суб'єктивності в цій процедурі якісного дослідження, також використовувалися міри надійності між кодувальниками.

Використання програмного забезпечення або програм штучного інтелекту також не було варіантом для розробки категоризації, оскільки це була не дедуктивна процедура, в якій всі назви категорій вже були б відомі, а індуктивна, в якій категорії спочатку повинні були бути розроблені на основі літератури.

Сформовані висновки у вигляді стану досліджень і категоризації докладно описані у наступних розділах. Детальний процес етапів огляду представлений в додатку А.

Таблиця 1 – Етапи систематичного огляду літератури

Етап перегляду	Опис
1	Формулювання цілей дослідження
2	Пошук – Розробка пошукової стратегії (вибір баз даних, визначення пошукових термінів і параметрів) – Проведення пошуку із застосуванням пошукової стратегії
3	Скринінг, відбір та оцінка результатів пошуку – Визначення критеріїв відбору (включення і виключення) та критеріїв якості – Відбір результатів пошуку на основі критеріїв відбору – Об'єднання вибірки з усіх баз даних і видалення дублікатів – Оцінка якості на основі критеріїв якості та видалення у випадку недостатньої якості
4	Аналіз і синтез – Створення форм для вилучення даних – Аналіз даних – Синтез даних
5	Представлення та інтерпретація результатів – Презентація результатів дослідження – Висновок

1.5 Висновок до першого розділу

У даному розділі наведено інтеграцію концепції кіберфізичних систем у різноманітні наукові та практичні дисципліни, що розглядаються як ключ до ефективного використання в Індустрії 4.0. З моменту введення терміна, КФС проявили себе як потужний інструмент для оптимізації і автоматизації виробничих процесів, моніторингу та управління в реальному часі через збір і аналіз великих обсягів даних. Технічне забезпечення і програмне інтегрування,

разом із врахуванням соціальних і організаційних аспектів, визначають успіх впровадження КФС в контекстах, що міняються. Значна увага в дослідженнях приділяється не тільки технічним можливостям, але й безпеці, інтероперабельності, а також етичним аспектам використання КФС. В контексті промислового застосування, КФС демонструють здатність реалізовувати "розумні" функції виробництва і продуктів, значно підвищуючи ефективність і адаптивність виробничих систем, що стає основою для трансформації виробничих підприємств під вимоги Індустрії 4.0. Все це робить КФС невід'ємною частиною сучасної промисловості, відкриваючи нові горизонти для досліджень і практичного застосування.

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТНА ЧАСТИНА. ПЕРИФЕРІЙНІ І ХМАРНІ СЕРВІСИ ПРОМИСЛОВОГО ІОТ

2.1 Промислові виробничі системи

Промислові виробничі системи – це кіберфізичні системи (КФС), які об'єднують сировину, обладнання, людей і процеси на декількох майданчиках у складні системи систем (SoS), що залежать від даних для ефективної та стабільної роботи [43]. Крім того, обладнання та пристрої самі покладаються на дані протягом усього життєвого циклу як інтелектуальні продуктові системи з метою надання допоміжних послуг, що оптимізують роботу або покращують дизайн [44]. Сучасні кіберфізичні виробничі системи (CPPS) базуються на композиції гетерогенних систем і компонентів від різних постачальників, які повинні безперешкодно обмінюватися даними та інтегрувати сервіси під час виконання.

Хмарні обчислення ґрунтуються на економії від масштабу, що дозволяє використовувати продуктивність, масштабованість і надійність в економічно ефективний і керований спосіб. Для застосунків Інтернету речей (ІоТ) хмарні обчислення можуть доповнити обмежений обсяг пам'яті та вимоги до масштабних обчислень і аналітики. Дані ІоТ генеруються зі зростаючою швидкістю з новими застосунками, що використовують ці дані [45], а також у фізичному контексті з вимогами реального часу [46]. Виклик полягає в ефективному аналізі даних при прагненні до операцій, керованих даними [47]. У хмарних обчисленнях передача даних, розподіл обчислювальних ресурсів і, нарешті, надання результатів, як правило, включає затримки і витрати на передачу [48].

Граничні обчислення можна розглядати як хмарні обчислення, наближені до реальних застосунків і користувачів, а іноді їх також називають розширенням хмари в безпосередній фізичній близькості [49]. Граничні

обчислення характеризуються коротким часом відгуку і зменшеною передачею даних до хмари.

Області застосування, які отримують перевагу від низької затримки, включають типові завдання управління виробництвом і обладнанням, автономне прийняття рішень або застосунки для моніторингу. Завдяки периферійним обчисленням дані зовсім не обов'язково передавати через Інтернет, особливо якщо вони використовуються лише локально, або якщо в хмару потрібно агрегувати лише частину даних. Для застосунків, де обробляються великі обсяги даних, це може бути перевагою з точки зору витрат на передачу, зберігання та обробку.

Незважаючи на зусилля в галузі стандартизації Індустрії 4.0, «розумного» виробництва та пов'язаних з ними парадигм [50], проблеми інтеграції не були вирішені. Виклики пов'язані не лише з інтероперабельністю даних, що генеруються гетерогенними пристроями та системами [51], але й з інтероперабельністю системних архітектур та динамічних композицій у їхній взаємодії, а також цілих екосистем. Проблеми виробничої сфери підкреслюються все ще незрілими інформаційно–комунікаційними технологіями, доступними для реалізації безшовного, відкритого хмарного континууму IoT.

Важливим є дослідження функціональних можливостей та технічних характеристик, які необхідні для гнучкої організації хмарних і периферійних сервісів у виробничих застосунках IoT. Запропоновано уніфікований підхід до управління гетерогенними потоками даних від пристроїв Інтернету речей та інших виробничих систем, а також архітектуру інтеграції для організації конфігурацій між компонентами сервісів застосунків як на периферії, так і в хмарі. Архітектурний підхід базується на моделі інтеграції сервісів Arrowhead Framework (AHF) [52]. Підхід розроблений для того, щоб пристосуватись до реконфігурації потоків даних, які можуть охоплювати сотні та тисячі одиниць та/або виробляти величезні обсяги даних. Більш гнучка оркестрація обчислювальних сервісів у периферійних і хмарних середовищах необхідна у

зв'язку з появою нових сценаріїв використання даних, розвитком прикладних систем і балансуванням мережевого трафіку та обчислювальних ресурсів.

2.2 Моніторинг виробництва

Виробництво зазвичай поділяється на кілька підпроцесів, кожен з яких має свій власний набір етапів з використанням різних інструментів від різних виробників. Операції часто виконуються вручну і не залежать від інших виробничих ділянок, оскільки технологія з'єднання розрізнених систем ще не набула широкого розповсюдження. Інформацію про стан і показники продуктивності необхідно збирати від систем і підсистем, що контролюються, у виробничому процесі і негайно передавати далі. Необхідна інформація може бути різною для кожного виробничого процесу, залежно від потреб моніторингу. Крім того, рішення для збору даних може залежати від конкретного пристрою. Таким чином, для моніторингу виробництва система повинна забезпечувати незалежні та взаємозамінні програмні компоненти та комунікації. У цьому випадку було б корисно мати можливість розгортати і керувати довільними програмними сервісами на різноманітних пристроях, щоб задовольнити різні потреби моніторингу.

Різні варіанти використання мають різні потреби, починаючи від відносно простих до визначення проблемної частини і закінчуючи прогнозуванням майбутніх відмов. Наприклад, системі прогнозування, що використовує цифрову модель двійника, може знадобитися лише щоденна вибірка прискорень, щоб виявити, що щось вийшло з ладу, тоді як для запобігання подальшим поломкам можуть знадобитися мілісекундні вимірювання.

Простіше побудувати систему, що базується на передачі всіх даних з датчиків у хмару для обробки, але на практиці це не завжди можливо. Витрати, пов'язані з передачею, зберіганням та аналізом даних, стають непосильними для виробника обладнання у великих масштабах.

Метою використання системи моніторингу стану є спрощення архітектури системи моніторингу стану, щоб вона була схожою на різних рівнях, навіть якщо фізичні компоненти і системи вимірювання відрізняються. Крім того, розвиток систем і перенесення обробки з хмари на периферію повинні бути можливими в міру того, як продукт дозріває і знання про вимірювані явища збільшуються.

2.3 Короткий огляд вимог IoT

В якості функціональних вимог від систем IoT очікується

- Обмінюватися даними IoT та іншими потоками даних з різних датчиків і систем в уніфікованому і стандартизованому форматі, підтримуючи перенаправлення різним споживачам, наприклад, ШІ.

- Попередньо обробляти дані та виконувати розширені функції аналізу даних локально на периферії та/або в хмарі, балансує та оптимізує місця, де відбуваються обчислення

- Централізоване управління динамічними конфігураціями системи та децентралізованими інформаційними потоками, а також авторизація композицій сервісів у застосунках.

Додаткові функції та вимоги до системи:

- Інформаційна безпека – забезпечити інформаційну безпеку від пристроїв до обробки, а також те, що динамічні композиції формуються тільки для довірених сервісних композицій, і, отже, також дозволити різним сторонам працювати з одними і тими ж даними і в одних і тих же мережах.

- Продуктивність, масштабованість і надійність – підтримка надійної передачі простих значень до масивів необроблених даних вимірювань для існуючих і нових прикладних сервісів.

- Керованість і підтримка – методи управління застосунками без системних залежностей від окремих пристроїв IoT або систем, що беруть

участь, а також масштабованість для розробки нових системних інтеграцій застосунків.

– Інтероперабельність – заснована на відкритих моделях і специфікаціях, що не обмежуються конкретним обладнанням або протоколами, і здатна задовольнити широкий спектр використання застосунків.

2.4 Архітектура платформи ПоТ

Щоб забезпечити виконання представлених вимог, було розроблено концептуальну архітектуру для сервісів даних і програмного забезпечення, як показано на рисунку 2.1. Першочерговим завданням проекту є забезпечення можливості розробки нових додатків на основі виробничих даних або вимірювань IoT для різних цілей. Важливою метою є також підтримка різних існуючих апаратних і програмних платформ.

Традиційний ПоТ покладається на передачу даних вимірювань в хмару для аналізу і розробки. Однак багато застосунків виробляють значні обсяги даних, і є додатки, де неможливо або небажано передавати все в хмару. Попередня обробка або аналітика на периферії економить передачу даних, а також може зменшити залежність від Інтернету. Надійний зв'язок з низькою затримкою і в режимі реального часу може бути реалізований локально, в той час як інтернет-сервіси не можуть гарантувати затримки, які іноді потрібні.

Периферійні обчислення не замінюють хмарні обчислення, а доповнюють їх. Ресурси периферійних обчислень обмежені в тому сенсі, що додаткові обчислювальні ресурси не можуть бути легко надані, як у хмарі. Тому рішення ґрунтується на передумові, що обчислювальні функції можуть бути розгорнуті як на периферії, так і в хмарі. Якщо з'являються нові обчислювальні завдання, вони можуть бути виконані в хмарі і підключені до застосунків так само, як і в локальних приміщеннях.

Аналітика в масштабах всього парку і, наприклад, навчання моделей машинного навчання (МН), як правило, відбувається в хмарі, як показано на рисунку 2.1, оскільки може знадобитися збір даних з декількох сайтів.

Очікується, що в майбутньому попит на периферійні обчислення в цій галузі зростатиме не лише для виведення МН, але й для контекстуалізованого навчання в окремих периферійних точках. Це завдання, які виникають на периферії епізодично, тоді як, наприклад, попередня обробка – це те, що повинно виконуватися постійно і для чого потрібно резервувати потужність і сховище. Набір доступних периферійних та хмарних сервісів можна визначити як $S = \{S_{11}, \dots, S_{ij}\}$. Склад периферійних і хмарних сервісів можна сформулювати у вигляді графа $G_s = \{V, E\}$, де V позначає множину вершин між усіма сервісами, а E – взаємодію між сервісами. Враховуючи атрибути якості обслуговування (QoS) різних екземплярів сервісів, ми можемо додатково сформулювати задачу композиції у вигляді графа сервісів $G_s = \{V, E, QoS\}$. Вибираючи на основі компонентів

QoS, наприклад, вартості, затримки і точності, можна досягти композиції відповідних сервісів для композиції. Під час виконання ця комбінація повинна бути виконана, коли нові системи з'являються в мережі або коли змінюються атрибути QoS. Компонент QoS або його оптимізація не обговорюється далі, оскільки ця стаття зосереджена на технології, що дозволяє організувати і налаштувати композицію периферійних і хмарних сервісів під час виконання.

Оскільки потреби застосунків відрізняються, важливо мати гнучкість у налаштуванні потоків даних, починаючи з пристроїв і датчиків IoT польового рівня. Пристрої Інтернету речей, що ініціюють з'єднання, отримують конфігурації від керуючої інфраструктури, наприклад, куди надсилати отримані дані. Аналогічно, прикладні сервіси, які отримують (витягують) дані з пристроїв Інтернету речей або сховищ даних, можуть отримувати свої конфігурації при запуску і періодично оновлювати їх, якщо композиції або інформаційні потоки потребують оновлення.

Центральним елементом концепції є управління конфігураціями і композиціями сервісів в інфраструктурі за допомогою єдиного методу, незалежного від характеристик різних інтегрованих пристроїв, сервісів або систем. Це вимагає узгодження інтерфейсів прикладного програмування (API), а також механізмів налаштування і конфігурації.

Прикладні системи, розроблені на основі цієї архітектури, повинні використовувати існуючі стандарти або узгоджувати структури повідомлень для кожної прикладної системи або для кожної інтеграції. Повідомлення та API прикладних сервісів повинні мати уніфіковану, стандартизовану структуру, щоб бути взаємозамінними у гнучких композиціях.

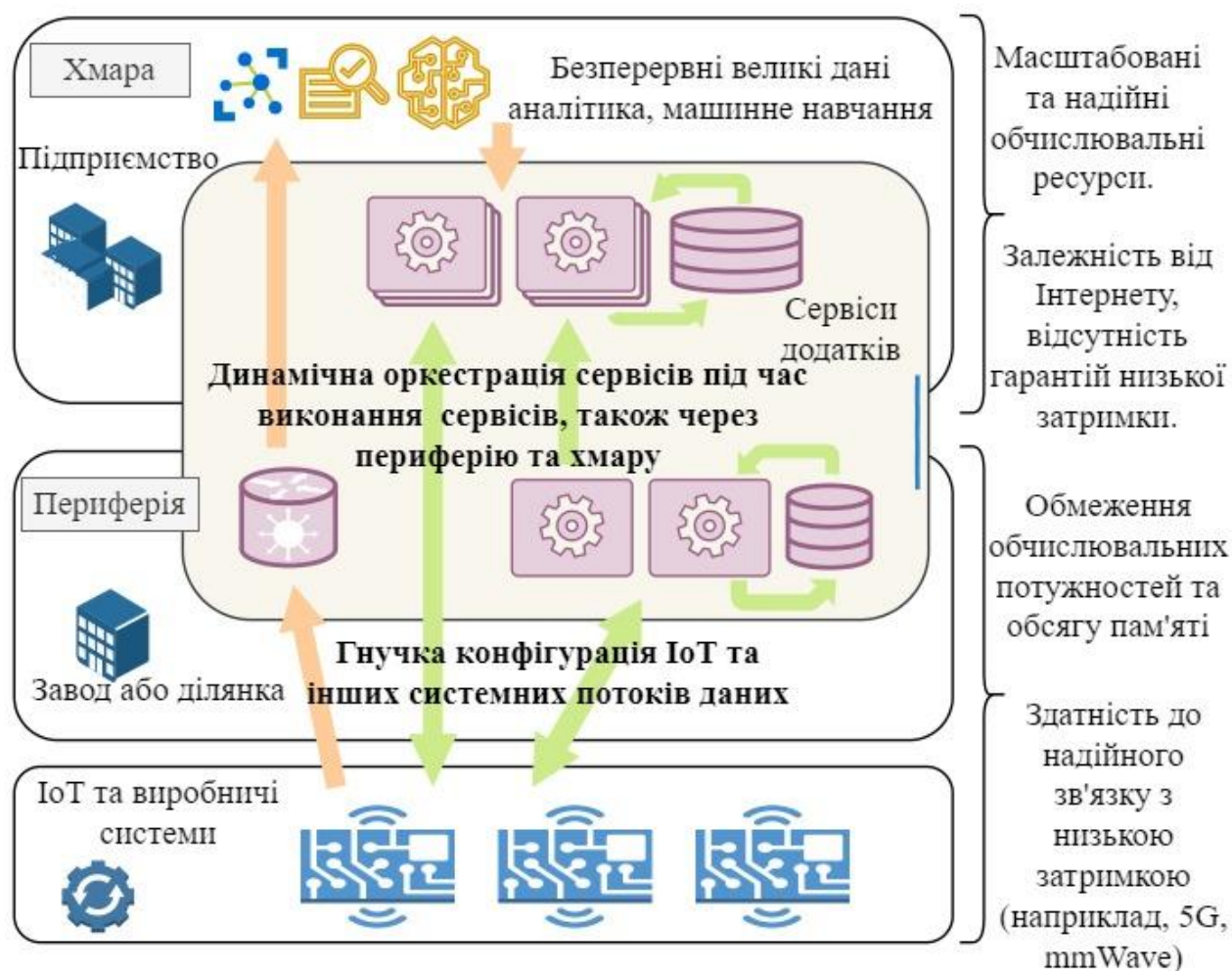


Рисунок 2.1 – Архітектурна концепція для створення застосунків на основі даних, в яких потоки даних від IoT та інших систем рівня заводу конфігуруються і динамічно організовуються за допомогою прикладних сервісів на периферії і в хмарі.

2.5 Висновок до другого розділу

Представлено два взаємодоповнюючих промислових приклади використання, моніторинг виробничих збірок і моніторинг стану при дробленні гірських порід, в яких реалізовано і оцінено цей підхід. А саме:

- окреслення вимог і розробка нової концептуальної архітектури для забезпечення інтероперабельності і динамічної хмарної оркестрованої конфігурації як потоків даних, так і сервісів у виробничому IoT

- оцінка моделі інтеграції сервісів ANF та реалізованої концептуальної архітектури на відповідність вимогам у двох реальних промислових випадках використання при розробці SoS–застосунків для КФС.

У розділі підкреслюється значення інтеграції кіберфізичних систем в сучасному промисловому виробництві. Ці системи, об'єднуючи сировину, обладнання, людські ресурси і процеси, створюють складні системи систем, що базуються на використанні даних для забезпечення ефективності та стабільності операцій. Важливу роль в цих системах відіграють хмарні та граничні обчислення, які допомагають оптимізувати обробку великих обсягів даних і знизити витрати на передачу даних, наближаючи обчислювальні потужності до місць їх безпосереднього застосування. Однак, проблеми інтеграції та стандартизації все ще залишаються серйозним викликом для повної реалізації потенціалу цих технологій в контексті Індустрії 4.0. Розвиток функціональних можливостей і технічних характеристик, необхідних для гнучкої організації хмарних і периферійних сервісів, є критичним для адаптації до змінюваних потреб виробничих застосунків IoT, підкреслюючи потребу в уніфікованому управлінні даними і інтеграції систем.

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА. КАТЕГОРИЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ В КОНТЕКСТІ ІНДУСТРІЇ 4.0

3.1 Кіберфізичні системи в Індустрії 4.0

Категоризація впорядковує теми, пов'язані з КФС та актуальні в контексті Індустрії 4.0, у структурований спосіб. З цією метою розроблено аналіз на основі літературних джерел, включаючи характеристики та загальний контекст промислових КФС, а також потенціал і можливості та виклики, пов'язані з їх застосуванням. Представлено вимоги до промислових КФС, концепції та технології, якими вони супроводжуються, а також їх функціональність як соціотехнічних систем. Крім того, окреслено архітектуру промислових КФС та охарактеризовано її вплив на створення промислової цінності. Розглянуто потенціал промислових КФС щодо транс–організаційної інтеграції та створення альянсів.

Фундаментальні характеристики КФС застосовуються до промислового застосування так само, як і до інших сфер, і поділяються на загальні та самохарактеристики. До загальних характеристик відносяться зв'язність і модульність; вони підкреслюють всебічну адаптивність промислових КФС, які можуть бути розроблені для реагування на різні ситуації і завдання за допомогою універсальних інтерфейсів і модульної побудови. Можливість роботи в режимі реального часу та відстежуваність гарантують, що адаптація системи може бути виконана як «ad hoc», так і піддана перевірці в цьому контексті.

Загальний контекст, в якому знаходяться системи, характеризує їх саме як промислові КФС. У літературі це часто називають Індустрією 4.0, як показано на рисунку 3.1.

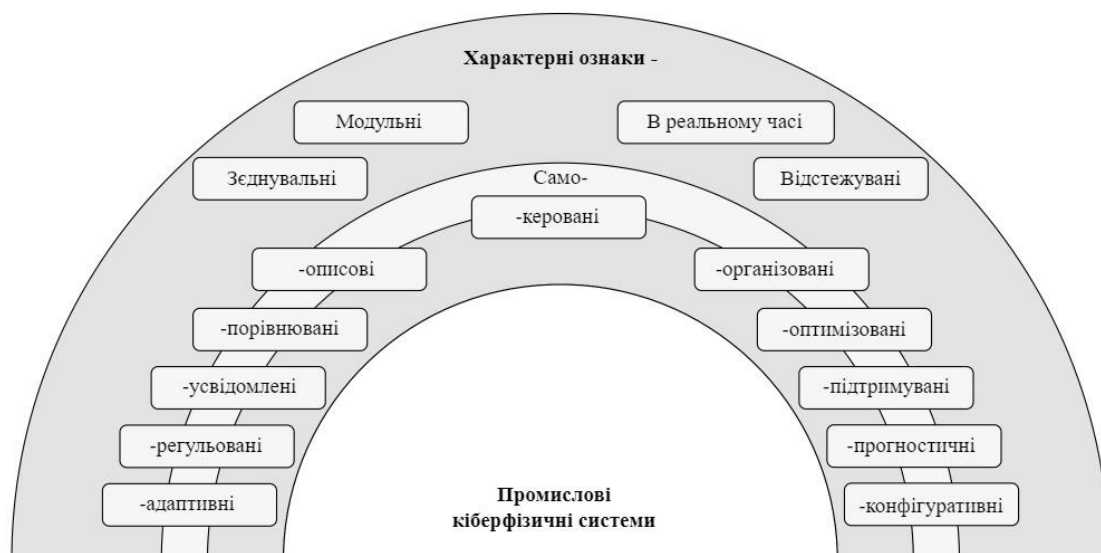


Рисунок 3.1 – Характеристики промислових КФС

З організаційної точки зору, ІоТ охоплюють як виробничі, так і управлінські аспекти, а також забезпечують переваги для користувачів продуктів і послуг. Загалом, процеси можуть бути додатково автоматизовані та автономізовані, особливо з урахуванням раніше розглянутих характеристик промислових КФС. Завдяки безперервному моніторингу фізичних і цифрових процесів і, як наслідок, гомогенізації, досягається покращений загальносистемний рівень інформації, що дозволяє підвищити ефективність як управлінської діяльності, так і виконання процесів. Серед іншого, це уможливорює виробництво одиничних партій за собівартістю, що наближається до собівартості масового виробництва, а це означає, що можна передбачити ринковий попит на індивідуалізацію продукції. Завдяки універсальним інтерфейсам і зростаючій незалежності від місця розташування, а також менш ієрархічній системній архітектурі, промислові КФС можуть бути створені в децентралізованих структурах. Децентралізація в поєднанні з підвищеним рівнем інформації в рамках загальної системи також дозволяє обробляти складні події з більшою гнучкістю. Наприклад, виробничі та логістичні процеси можна координувати зі значно коротшим горизонтом планування, що полегшується скороченням часу виконання замовлення. Підвищення рівня інформації про стан компонентів системи за допомогою датчиків дозволяє

виявляти сценарії несправностей/відмов раніше або навіть прогнозувати їх, що призводить до покращення якості як виробничих потужностей, так і продукції, що випускається. Безперервний і обширний зворотний потік інформації про стан від «розумних» продуктів ще більше посилює цю тенденцію. Серед іншого, загальне стрімке зростання доступності даних дозволяє розробляти нові бізнес–моделі, засновані на даних. Поряд з цим виникають можливості для стратегій проникнення на ринок у вигляді розширення продуктового портфелю та скорочення часу виходу на ринок.

На додаток до широких потенціалів/можливостей, впровадження промислових КФС також несе з собою виклики/проблеми, в тому числі збільшення складності системи в результаті далекосяжних змін у розмірі та структурі системи. Таким чином, кількість компонентів системи (технологічних, організаційних, міжорганізаційних) може значно збільшитися через з'єднання і взаємодію раніше незалежних і самодостатніх систем, а також через розмивання системних кордонів у бік спеціальних систем систем. Крім того, системні архітектури стають більш багаторівневими, а загальна різноманітність систем збільшується. Поряд зі змінами в системних архітектурах, промислові КФС також призводять до зростання складності організаційного ландшафту. Лінійні процеси створення цінності розпадаються на цілісні мережі створення цінності, які стають все більш міжорганізаційними. Поглиблення міжорганізаційної інтеграції, зокрема, може призвести до зниження прозорості системних структур, проблем синхронізації та нових викликів в управлінні ризиками і невизначеностями. Через інтеграцію численних системних компонентів, безперервний моніторинг умов і, як наслідок, швидкості та обсягів передачі даних, а також притаманний промисловим системам зворотний зв'язок у реальному часі між датчиками і виконавчими механізмами, проблеми зв'язку, такі як затримки або джиттер, становлять серйозну загрозу для функціональності системи. Як і у випадку з багатьма іншими питаннями оцифрування, впровадження промислових КФС іноді викликає занепокоєння і застереження серед працівників через уявлення

про те, що умови праці можуть змінитися, а певні професії можуть стати застарілими.

Додаткові виклики пов'язані з великими зусиллями з впровадження. У випадку промислових КФС, які мають міжорганізаційні структури або використовуються для сприяння гібридним мережам створення вартості, виникають юридичні питання, оскільки не завжди можна однозначно визначити обов'язки та відповідальність у разі системних збоїв або виробничих дефектів, які призводять до неправильного функціонування продукції.

Важливі також виклики – це безпека та захищеність. Сфера безпеки поділяється на захист від небезпек та стан. У сфері захисту від небезпек описуються стратегії, спрямовані на запобігання збоїв у роботі системи за допомогою моніторингу навколишнього середовища або, у разі таких збоїв, на полегшення управління аварійними ситуаціями. Контроль стану системи, який намагається виявити ситуації відмов до того, як вони стануть проблемами безпеки, тісно пов'язаний з цим. У той час як безпека стосується операційної цілісності систем, тобто захисту людей і навколишнього середовища від фізичної шкоди, захищеність стосується захисту даних та інформації в системі. У контексті промислових КФС це стосується захисту від загроз і вразливостей, таких як кібератаки, а також забезпечення конфіденційності, наприклад, шляхом запобігання зловживанню даними. Крім того, застосовуються практичні заходи для виявлення атак, контролю інформаційних потоків, а також захисту повідомлень доступу та управління (криптографія, цифрові підписи та стеганографія).

До промислових КФС висуваються різні вимоги, які є необхідними або переважними для їхньої функціональності та експлуатації. До них відноситься автономність, яка забезпечує функціонування систем в рамках визначених функціональних завдань, особливо якщо вони не можуть експлуатуватися ззовні в запланованому або незапланованому обсязі. З цією метою системи повинні бути спроектовані таким чином, щоб бути контекстно-орієнтованими і чутливими, щоб зміни в стані і статусі не тільки відчувалися, але і могли бути

розглянуті в контексті застосування і працювати відповідно до заздалегідь визначених алгоритмів. Це забезпечує високий ступінь надійності та безвідмовності щодо доступності та поведінки системи, а також процесів створення цінності на її основі. Така надійна і безвідмовна доступність системи є особливо необхідною, оскільки, особливо в контексті великомасштабних взаємопов'язаних систем, збої в роботі (під)систем можуть мати серйозні наслідки, включаючи крах цілих систем систем. Доступність також є надзвичайно важливою, коли процеси, що мають відношення до безпеки, відстежуються і контролюються системою. У контексті підтримки функціональності системи в несприятливих умовах і в критичних ситуаціях, надійність і стійкість також є важливими для промислових КФС. Певною мірою системи повинні бути здатні впоратися зі змінами навколишнього середовища; їхня конфігурація повинна бути здатна надійно витримувати ці умови. Якщо зміни в навколишньому середовищі настільки серйозні, що з ними не може впоратися надійність, системи повинні бути настільки стійкими, щоб вони могли відповідним чином коригувати і адаптувати свої конфігурації. Стан системи повинен бути спостережуваним, з високим ступенем надійності, а вихідна інформація про стан і процеси управління повинна бути достовірною, щоб адміністратори могли в будь-який час приймати рішення, засновані на фактах. У цьому контексті моніторингу та управління системою також важливо мати максимально точну передбачуваність очікуваної поведінки системи в різних ситуаціях, щоб забезпечити керованість системи, незважаючи на її складність і високий ступінь автоматизації та автономності.

Для того, щоб реагувати на зміни і нові вимоги в процесах створення цінності на основі промислових КФС, такі як короткострокові коливання потужностей або довгострокові ринкові, виробничі або пов'язані з продуктом тенденції, ще однією вимогою до промислових КФС є їх масштабованість, яка може бути виконана в короткі терміни. Крім того, оскільки, як уже згадувалося, діяльність зі створення цінності стає все більш інтерактивною та мережевою як

всередині, так і між організаціями, інтероперабельність окремих промислових КФС також представляє великий інтерес.

Всі вищезгадані вимоги повинні виконуватися з урахуванням принципів сталого розвитку, щоб досягти ефективності та результативності в економічному, екологічному та соціальному вимірах.

У результаті стрімкого розвитку те, застосовується широкий спектр взаємодоповнюючих концепцій і технологій. При цьому промислові КФС часто слугують сполучним елементом, який систематично інтегрує ці концепції та технології, орієнтуючись на цілі та специфіку застосування. Аналіз великих даних є однією з таких концепцій. Завдяки широкому використанню сенсорних технологій у виробництві і в продуктах як таких, промислові КФС часто генерують великі обсяги даних, які можуть бути передані для аналізу на основі алгоритмів, таких як виявлення/розпізнавання закономірностей в інтелектуальних даних для загальних цілей оптимізації, а також для послуг і бізнес-моделей, керованих даними – дані як послуга (DaaS). Як часто розподілені і децентралізовані системи, промислові КФС використовують хмарні, периферійні і повсюдні обчислення для обробки даних і управління системою, відокремлені від традиційної піраміди автоматизації. У багатьох сценаріях застосування промислових КФС підходить використання штучного інтелекту (ШІ), наприклад, в якості основи для самохарактеристик, описаних раніше. Традиційні методи для цього включають міркування або машинне навчання. Промислові КФС можуть бути підключені до систем відповідно до контексту і завдання. Для забезпечення цілісності при обміні даними і ресурсами адекватним рішенням є технології розподіленого реєстру, такі як блокчейн. Інша концепція, сумісна з ІоТ та КФС, – це адитивне виробництво. З одного боку, за допомогою цієї концепції можна вирішити такі питання, як ефективність використання ресурсів, доступність запасних частин, швидке створення прототипів тощо. З іншого боку, самі виробничі процеси можуть застосовувати такі технології, як 3D-друк.

Інша концепція, яка йде пліч-о-пліч з оцифруванням промислових процесів, – це робота 4.0/майбутні роботи, яка описує розробку інноваційних методів роботи, які є можливими або необхідними завдяки технологічним змінам. Це може стосуватися загальних умов праці в промисловому секторі, які можуть навіть дозволити виконувати роботу незалежно від часу і місця, а також у віртуальних командах/натовпі. Крім того, впровадження ІоТ часто супроводжується значними змінами у вимогах до роботи та професійної підготовки. Так, потреба в міждисциплінарних компетенціях виникає через зростання складності систем, що також відображається в прогресуючому зв'язуванні та перекритті дисциплін, що мають відношення до створення цінності. Зростаюча автоматизація, пов'язана, зокрема, з промисловими КФС, призводить до скорочення попиту на низькооплачувані та некваліфіковані робочі місця. Таким чином, виникає потреба у зміні ролей, що часто вимагає масштабних заходів з підготовки кадрів.

Спектр концепцій і технологій, які доповнюють промислову КФС, показано на рисунку 3.2.

На додаток до первинного технічного розгляду промислової КФС, в літературі також розглядається інтеграція людей у вигляді соціотехнічних систем. У сфері допоміжних видів діяльності це впливає на виконання робіт. Завдяки зростаючій доступності інформації та новим формам, інформація може надаватися через різні системи підтримки прийняття рішень, наприклад, за допомогою рекомендацій щодо дій в технічному обслуговуванні. А завдяки зростанню оцифрування документів/контенту зменшуються розриви в роботі засобів масової інформації.

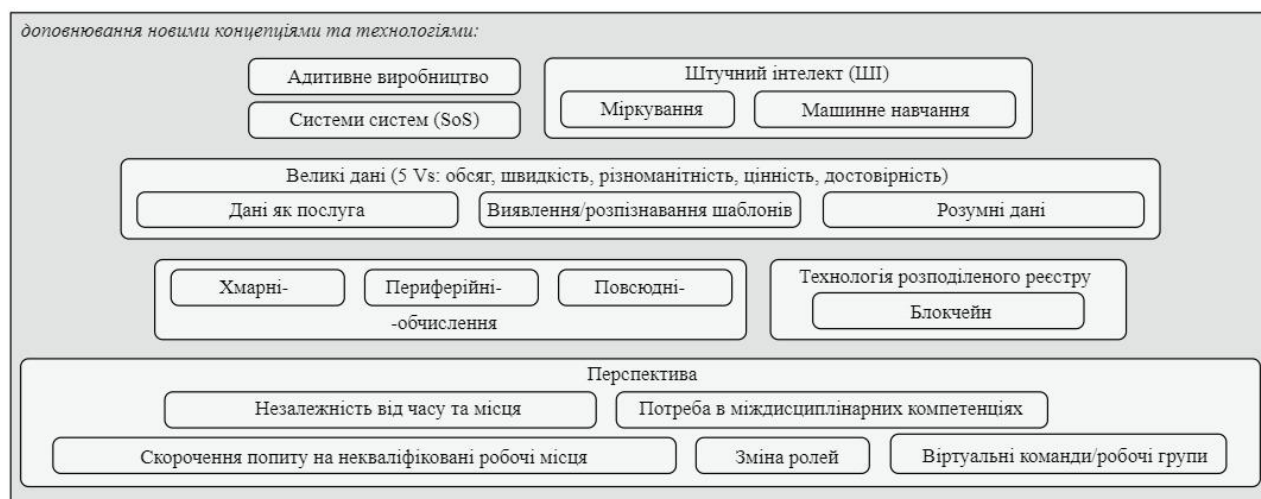


Рисунок 3.2 – Доповнення концепцій і технологій для промислових КФС

Архітектура промислових КФС, служить основним принципом і схемою для визначення конкретних характеристик і конфігурацій системи з проектних альтернатив, залежно від функціональних і нефункціональних вимог, а також для вибору відповідних системних компонентів. Промислові КФС об'єднують технології та концепції (промислового) Інтернету речей (ІоТ) або Інтернету речей (ІоТ), які можна розділити на кіберсферу і фізичну сферу. Архітектура програмного забезпечення та обробка даних промислових КФС знаходяться в кіберсфері, в той час як апаратна архітектура та взаємодія людина–комп'ютер існують у фізичній сфері. Мережева архітектура слугує сполучною ланкою між цими двома сферами.

Архітектура програмного забезпечення і КФС охоплює наступні теми: Аналізуються адекватні операційні системи для відповідних компонентів системи, проектування цих систем з точки зору програмування з підгалузями алгоритмів і мов програмування, а також програмні агенти з подальшими підгалузями мобільних агентів і мультиагентів. А також достатнє проміжне програмне забезпечення у вигляді служб розподілу даних (DDS) та механізмів документообігу. Крім того, представлені концепції, які дозволяють динамічне оновлення програмного забезпечення (DSU) для КФС.

Що стосується даних в контексті промислових КФС, то дослідження передбачають наступні основні аспекти. По–перше, обговорюється збір даних

за допомогою датчиків. Потім ці дані можуть бути агреговані з існуючими даними або об'єднані з даними із зовнішніх джерел. Отримані набори даних аналізуються і оцінюються за допомогою обробки.

Область апаратної архітектури містить компоненти, які фізично складають промислові КФС. В основному це вбудовані системи, розширені датчиками, які безперервно реєструють фізичні умови навколишнього середовища. Отримані дані обробляються процесорами та польовими програмованими логічними матрицями (ПЛІС). Подальша робота виконавчих механізмів, які, в свою чергу, впливають на фізичне середовище, здійснюється контролерами. Ідентифікатори забезпечують індивідуальну ідентифікацію кожного компонента системи. Крім того, пасивні компоненти можуть бути інтегровані в промислові КФС за допомогою технологій радіочастотної ідентифікації (RFID), таких як зв'язок ближнього поля (NFC). Крім того, в контексті промислових КФС значна увага приділяється сфері робототехніки.

У сфері НСІ розглядається інтеграція людини в промислову КФС. На цьому тлі в літературі йдеться, серед іншого, про підтримку людини при виконанні фізичної роботи. Наприклад, коботи або колаборативна робототехніка використовуються для того, щоб люди і машини могли виконувати завдання спільно, щоб оптимально інтегрувати відповідні вищі навички. Технології також можна носити на тілі людини у вигляді натільних пристроїв; ці пристрої можуть надавати фізичну підтримку, як у випадку з екзоскелетами (з електроприводом), або можуть використовуватися для надання інформації у вигляді пристроїв доповненої реальності (AR) і віртуальної реальності (VR). У сфері користувацьких інтерфейсів промислових КФС в літературі розглядаються різні форми людино–машинних інтерфейсів (НМІ) і графічних інтерфейсів користувача (GUI), якими можна керувати за допомогою управління жестами або голосом. У загальному контексті НСІ особливого значення набуває необмежена співпраця між людиною і машиною в поєднанні з найвищими стандартами безпеки на робочому місці.

Мережева архітектура промислових КФС спирається на різноманітні усталені технології та концепції і за потреби адаптує їх до специфіки, притаманної промисловим КФС. Загалом, мережева архітектура забезпечує зв'язок між кіберсферою та фізичною сферою і дозволяє передавати сигнали та дані. У літературі про промислові КФС багато уваги приділяється тому, як можуть бути розроблені мережеві архітектури в цих системах і яким вимогам вони повинні відповідати, а також велика увага приділяється самим мережам. Розглядаються різні типи мереж та їх придатність для різних застосувань через відмінності в потужності передачі, дальності та швидкості передачі даних. Першими варто згадати сенсорні мережі (SN), які можна розділити на мережі мобільних приводів/датчиків (MASN), бездротові сенсорні мережі (WSN) і бездротові мережі датчиків і приводів (WSAN). Ці типи мереж використовуються для зв'язку між датчиками і приводами, а також для забезпечення передачі вимірних значень навколишнього середовища і скоординованої поведінки приводів. Мережі контролерів (CAN) використовуються як система послідовної шини і є особливо корисними у сферах, пов'язаних з безпекою. Для застосування на невеликих відстанях бездротові персональні мережі (WPAN), такі як Bluetooth або бездротові персональні натільні мережі (WPBN), мають перевагу в тому, що можна зменшити перешкоди для інших мереж і знизити енергоспоживання передавальних пристроїв. Для широкомасштабного покриття використовуються поширені бездротові локальні мережі (WLAN). Для інтеграції географічно віддалених системних блоків використовуються глобальні мережі (WAN) у вигляді широкосмугових мереж великого радіусу дії (LoRaWAN) і широкосмугових мереж з низьким енергоспоживанням (LPWAN), які забезпечують високу енергоефективність. Стільникові мережі стандартів LTE і 5G також використовуються для з'єднання віддалених один від одного системних блоків, особливо якщо вони мобільні. Залежно від типу мережі та застосування, для визначення синтаксису зв'язку використовуються різні протоколи. У контексті промислових КФС в літературі згадуються IP, MAC,

телеметричний транспорт черг повідомлень (MQTT), TCP і TCP/IP. Динамічний доступ до спектру для оптимізації частотних спектрів з'єднань і маршрутизація для координації потоків повідомлень також розглядаються, оскільки вони можуть допомогти в обробці збільшених обсягів даних в системно-ефективний спосіб. Тема заводських мереж також викликає великий інтерес, тому велике значення в процесі розробки промислових КФС мають інтерфейси «plug-and-produce» і стандартизовані інтерфейси, які забезпечують сумісність різних виробничих установок з мінімальними зусиллями по налаштуванню. У цьому контексті міжмашинної комунікації (M2M) уніфікована архітектура OPC (OPC UA) забезпечує незалежну від платформи сервіс-орієнтовану архітектуру (SOA) для обміну машинними даними.

Додаток Б надає цілісну візуалізацію архітектури, що лежить в основі промислових КФС.

В рамках реалізації вже описаних потенціалів за допомогою застосування КФС вони трансформують створення промислової цінності. Це стосується всіх послідовних етапів та організаційних рівнів у ланцюгах створення цінності та мережах створення цінності, які можна розбити на передвиробничий етап, етап виробництва та етап використання продукту.

Вже на стадії передвиробництва починається моніторинг сировини, допоміжних та експлуатаційних матеріалів, а також деталей постачальників і будівельних груп, призначених для подальшого виробництва. Завдяки безперервному збору та консолідації даних про інтелектуальні (сировинні) матеріали/компоненти, інформація про стан, переробку та транспортування стає доступною у вигляді цифрових двійників вже на ранніх стадіях ланцюга створення вартості та захищеною від маніпуляцій і передається через організаційні кордони. Це стосується як щойно видобутої сировини, так і перероблених та оновлених матеріалів і компонентів в рамках управління життєвим циклом.

На етапі виробництва трансформація створення промислової цінності обговорюється в контексті цілісних концепцій, цифрової фабрики, розумної

фабрики та розумного виробництва. Виробничі системи, які використовують КФС у своїх процесах, називаються кіберфізичними виробничими системами (CPPS). У літературі CPPS розглядаються з різних точок зору; зокрема, можна виділити розробку виробничої системи, виконання виробництва та підтримку виробництва.

Розробка виробничої системи описує всі види діяльності та процедури на шляху до створення виробничої системи на основі КФС. На етапі проектування відбувається планування та розробка виробничих процесів. В рамках дослідження проектного простору обговорюються і структуруються варіанти і альтернативи майбутньої конфігурації системи. Подальший процес ІТ-проектування може здійснюватися за допомогою різних методологій проектування на рівні системи. При розробці на основі компонентів метою є розробка стандартизованих компонентів, які можуть бути використані кілька разів у різних застосунках модульних систем з однаковими або спорідненими вимогами, мінімізуючи кількість необхідних зусиль. Розробка на основі контрактів особливо важлива, коли велика кількість модулів від різних постачальників об'єднана в єдину систему. При цьому визначення формальних контрактів на використання стандартизованих інтерфейсів забезпечує сумісність. Проектування та розробка на основі моделей використовується, зокрема, коли запланована система має високий ступінь складності. Використовуючи заздалегідь визначені моделі з розширеними функціональними характеристиками, системи можуть бути детально змодельовані і протестовані ще до фізичної інженерії. Через раніше обговорювані проблеми, пов'язані з КФС, такі як складність, процедури комбінування методів є можливими. Якщо вони є партисипативними, співтворчими або відкритими, використовується термін «спільне проектування» (co-design).

Моделювання використовується для визначення поведінки та продуктивності, а також безпеки та захисту до того, як вони будуть побудовані та запуснені. У цьому процесі моделювання використовується для створення

фізичного або цифрового представлення системи або її окремих частин. Навмисні скорочення і пропуски призводять до індивідуальної абстракції оригіналу. Залежно від мети застосування, моделі можуть мати форму формальних описів, фізичних об'єктів або комп'ютерних віртуалізацій. При спільному моделюванні різні інструменти моделювання, які використовують різні моделі, кожна з яких представляє підсистеми, пов'язані між собою, щоб забезпечити цілісне моделювання системи. Ця процедура особливо підходить для CPPS, оскільки в цьому процесі поєднуються компоненти і системи з різних (технічних) дисциплін. Завдяки постійній оцифровці та зростаючій автоматизації виробництва шляхом створення КФС, управління виробництвом продовжує привертати велику увагу в літературі. Для програмованих логічних контролерів (ПЛК), які використовуються для управління системами, роботами та виконавчими механізмами, застосовується апаратне моделювання в циклі, щоб зробити їх працездатними до того, як вони будуть безпосередньо підключені до обладнання, яким потрібно керувати.

Для подальшого проектування КФС в ІоТ можна виділити дві початкові ситуації: Початкова, коли проектується абсолютно нова виробнича система, і Другорядна, коли існуюча виробнича система модернізується. При розробці вимог першим кроком є визначення характеристик і загальних параметрів, яким повинна відповідати система. Одним з факторів, що впливають на вимоги, є проектування продуктової лінії, яке, таким чином, повинно розглядатися в тісному зв'язку з проектуванням виробничої лінії. Залежно від вибору апаратного забезпечення, яке буде використовуватися, розробка програмного забезпечення повинна бути скоригована відповідним чином. Для поєднання та ітеративної адаптації апаратного та програмного забезпечення, доцільно створити їх прототипи перед тим, як інтегрувати їх в єдину систему управління виробничими процесами.

На етапі реалізації виробництва установки експлуатуються. Виробництво є невід'ємною частиною цього процесу. У цій галузі література розглядає вплив впровадження промислових КФС на управління виробництвом з підгалузями

управління процесами та управління процесами. Також описано, як застосування промислових КФС уможлиблює передове виробництво, що стосується виконання особливо складних виробничих процесів для виготовлення не менш складних продуктів, які можливі лише завдяки використанню цифрових технологій та концепцій. Більше того, хмарне виробництво, яке описує створення цінності, менш прив'язане до організації та місця розташування, за допомогою гнучких віртуальних виробничих мереж, також отримує вигоду від використання промислових КФС. Ще однією темою, яка привертає увагу в контексті виробництва на основі КФС, є промислові послуги. Сюди входить композиція послуг, яка пов'язана з організацією та упорядкуванням пакетів послуг, часто від різних постачальників, які об'єднуються для формування інтегрованих систем послуг. Однією з послуг, яку слід виділити в цій сфері, є технічне обслуговування. Через багато ступенів свободи щодо потенційних подій та їх вирішення, процеси, пов'язані з технічним обслуговуванням, важко оптимізувати. Однак, на основі даних з давачів у реальному часі та результатів аналізу великих даних, процедури технічного обслуговування на основі стану та прогнозування все частіше можна впроваджувати CPPS з великим потенціалом оптимізації.

Загалом, тобто за межами застосування для технічного обслуговування, промислові КФС з їхніми датчиками та виконавчими механізмами пропонують величезний потенціал для реформування моніторингу/контролю на виробництві. Моніторинг стану дозволяє отримати змістовний і всебічний огляд стану в режимі реального часу для всіх обладнаних компонентів системи, включаючи як виробничу інфраструктуру, так і виробничі деталі. Обробка подій зосереджена на безперервності та можливості роботи в режимі реального часу завдяки застосуванню промислових КФС. Це забезпечує надійний контроль, що запускається подіями, при якому реакція на події відбувається переважно автоматично, з адекватними заходами при їх виникненні. Для запобігання несприятливим подіям предиктивне керування використовує здатність розпізнавати тенденції та закономірності в даних і вживати

контрзаходів до того, як будуть досягнуті критичні значення. Крім того, у сфері нечіткого керування промислові КФС мають вплив на визначення керуючих змінних, а також на вже відомі SCADA.

На додаток до використання моніторингу/контролю, величезного збільшення інформації про стан і наборів даних, що генеруються промисловими КФС, сенсорна технологія також може бути використана для аналізу. Серед інших видів діяльності в цій галузі проводиться тестування, яке може бути значною мірою автоматизоване за допомогою тестування на основі моделей з оптимізованими умовами випробувального стенду. Ці випробування можуть перевіряти апаратне і програмне забезпечення, а також процеси на виробничих підприємствах і випуск продукції. Крім того, в літературі розглядається валідація і верифікація як засоби для виконання вимог з підгалуззями перевірки моделей і перевірки під час виконання. На додаток до цього, явно згадується власний аналіз.

Третьою і останньою предметною областю, є підтримка виробництва, включаючи логістику. Тут розглядається весь контекст обробки матеріалів всередині організації, а також за її межами. Особливо для складських систем промислові КФС пропонують широкі можливості застосування, які дозволяють оптимізувати складські об'єми та процеси завдяки підвищенню прозорості. На додаток до складування, внутрішня логістика також отримує переваги у вигляді автоматизованих керованих транспортних засобів (AGV), які забезпечують високоавтоматизовані, засновані на подіях і системно інтегровані потоки матеріалів у виробництво. Зі створенням інтелектуальних транспортних систем (ITS) промислові КФС також застосовуються в логістиці між географічно розподіленими виробничими майданчиками організації або різними організаціями в ланцюжку створення вартості, що призводить до оптимізації ланцюжка поставок, включаючи доставку кінцевої продукції постачальникам і кінцевим споживачам.

Іншою сферою, пов'язаною з підтримкою виробництва, є інтеграція заводів в інтелектуальну мережу. Інтеграція промислових КФС в

енергопостачання виробничих об'єктів впливає на загальну енергоефективність цих об'єктів завдяки кращому врахуванню потреб в енергії, її доступності та витрат при плануванні та виконанні виробничих процесів. Крім того, такі методи, як збір енергії з фізичних процесів промислових СЕС та управління акумуляторними батареями в менш залежних від мережі виробничих процесах, відкривають можливості для поліпшення енергетичних балансів.

На третьому етапі, етапі використання продукту, промислові КФС використовуються для передачі відповідної інформації про продуктивність продукту. Зокрема, «розумні» продукти, які завдяки інтегрованим датчикам і виконавчим механізмам дозволяють генерувати інформацію і дані, подібні до виробничих систем, що їх виробляють, дозволяють здійснювати моніторинг протягом усього життєвого циклу продукту (дані про використання продукту). Ця безперервно зібрана інформація про стан і використання продукції є дуже цінним джерелом для оцінки та можливого коригування параметрів планування продукції та її виробництва.

Згідно з цілісним підходом до управління життєвим циклом, переробка або даунсайклінг застосовується наприкінці використання продукту, під час якого дані, зібрані протягом усього життєвого циклу продукту у вигляді цифрового двійника, в кращому випадку знову вводяться в переробку або оновлюються на новому передвиробничому етапі.

Окрім об'єктів, які можна чітко віднести до окремих етапів, існують також об'єкти, які мають відношення до всього ланцюжка створення вартості, виходячи за межі компанії/організації. До них відноситься цифровий двійник, який об'єднує промислову інформацію на основі КФС про весь життєвий цикл як виробничих підприємств, так і продукції. У цьому контексті особливої уваги заслуговує зростаюче створення екосистем платформ, які дозволяють пов'язувати різноманітні послуги та обладнання з промисловими КФС у вигляді систем.

Потенціал застосування промислових КФС в межах компаній/організацій відкриває можливості для горизонтальної та вертикальної

інтеграції/оперативних і стратегічних альянсів. Горизонтальна інтеграція може здійснюватися або в межах компанії/організації між виробничими майданчиками, відділами, виробничими секторами тощо, які раніше працювали переважно незалежно, або вздовж ланцюжка створення цінності/в межах мережі створення цінності через організаційні кордони, як у видобувних, так і в переробних галузях.

Співпраця між організаціями або їхніми структурними підрозділами може здійснюватися на операційному або стратегічному рівні (вертикальна інтеграція). У той час як інтеграція на операційному рівні здебільшого стосується технічної та процедурної співпраці, яка координує виконання діяльності зі створення цінності, іноді автоматизованої, спеціальної та на короткі періоди часу, інтеграція на стратегічному рівні являє собою досить довгострокові альянси між двома або більше партнерами, які тісно пов'язують їхні промислові КФС та пов'язані з ними процеси.

3.2 Результати аналізу КФС

Отриманий масив даних досліджень було проаналізовано та перетворено на категоризацію тем, пов'язаних з КФС та актуальних в контексті Індустрії 4.0. Таким чином, це дослідження доповнює існуючі тематичні огляди та категоризації. На додаток до загального формування категорій, особливої уваги заслуговує промислова архітектура КФС шляхом включення технологічних, керованих даними та соціально-технічних поглядів, а також огляд створення цінності на основі цієї концепції.

Аналіз надає нові знання для дослідження КФС в контексті Індустрії 4.0. Стан досліджень насамперед дає уявлення про розподіл публікацій за дисциплінами. Більшість з них походять з комп'ютерних наук, комп'ютерної інженерії та інженерії, що означає, що ця предметна область досі розглядалася з вузькотехнічної точки зору. Тому перспективи бізнесу, створення цінності та інформаційних систем були дещо занедбані, що означає великий потенціал для

майбутніх досліджень у цих галузях. На даний момент ми знаходимося на межі досліджень інформаційних систем, які можуть бути більш задіяні тут для контекстуалізації технічних розробок у ширшому контексті, наприклад, бізнесовому, соціально-технічному, розвитку разом з користувачем/зацікавленою стороною та створення цінності. Це також відображається на стані досліджень щодо вимірів КФС. Досі існували переважно технічні дослідження і лише кілька з організаційних та гуманітарних/соціальних дисциплін.

Сфери застосування ПоТ є дуже різноманітними. Таким чином, можна стверджувати, що ПоТ є технологією загального призначення. Тим не менш, слід зазначити, що багато застосувань відносяться до сфери «розумного» виробництва.

На додаток до стану досліджень, категоризація промислових КФС також надає кілька нових ідей для дослідження КФС в контексті Індустрії 4.0. Порівняно з існуючими таксономіями, оглядами та класифікаціями дослідження є набагато повнішим і містить детальну класифікацію та аналіз промислових КФС.

Існує також велика кількість викликів, які необхідно подолати, особливо у сфері безпеки, що не дивно з огляду на зростаючу відкритість і взаємодію суб'єктів і систем. Архітектуру КФС можна охарактеризувати як дуже складну, що також підтверджується іншими авторами, які описували архітектуру КФС [53] та [54]. Архітектура, запропонована в цьому дослідженні, інтегрує програмне забезпечення, апаратне забезпечення, мережу, обробку даних. КФС також пропонують потенціал застосування для всієї мережі створення промислової цінності. Взаємопов'язаність і загальний мережевий характер КФС створює потенціал для оперативних і стратегічних альянсів з іншими організаціями та суб'єктами господарювання.

Описана вище категоризація тем, в контексті Індустрії 4.0 пропонує широкий спектр можливих застосувань на практиці. По-перше, вона надає огляд існуючого стану концепцій і технологій у сфері промислової КФС. Таким

чином, категоризація також слугує засобом аналізу потенціалу шляхом документування та оцінки існуючих технологій і систем, а також перевірки сумісності. Крім того, вона може бути використана для розробки стратегії. Можна звузити потенціал та обмеження щодо оцифрування та Індустрії 4.0, притаманні конкретній організації. Це також може допомогти в розробці стратегій модернізації або оцифрування з нуля. Категоризація уможливорює розробку КФС, полегшуючи вибір релевантних для системи технологій і концепцій, а також визначення інтерфейсів і стандартів. Нарешті, вона може бути використана в освіті та навчанні, наприклад, у форматах передачі знань, орієнтованих на користувача, в контексті впровадження систем і діяльності з оцифрування.

3.3 Інтеграція суміжних служб

Центральна частина програмної архітектури побудована навколо АНФ як засобу для виявлення, зв'язування та авторизації композицій додатків. У АНФ системи поділяються на три групи:

- Прикладні системи реалізують бізнес–логіку реальних рішень, надаючи та споживаючи послуги.
- Основні системи включають оркестратор, авторизацію та реєстр послуг, які надають засоби для виявлення, авторизації та реєстрації послуг відповідно. Через них прикладні системи формують систему систем (SoS).
- Допоміжні базові системи забезпечують додаткову функціональність для SoS. До них відносяться такі функції, як обробка подій, передача повідомлень через шлюзи, моніторинг QoS тощо.

Основним компонентом в АНФ SoS є оркестратор, який запитує реєстр послуг від імені прикладних систем–споживачів про доступні послуги, зареєстровані прикладними системами, що їх надають. Перш ніж відповісти споживачеві, оркестратор переконується, що споживачеві дозволено користуватися цією конкретною послугою. Оркестратор має два режими

роботи: Статичний режим, в якому зберігається певний набір правил щодо того, хто має надавати і споживати яку послугу; і Динамічний режим, в якому оркестратор відповідає списком доступних послуг, який може бути скорочений за допомогою додаткових параметрів запиту, встановлених системою—споживачем, включаючи, наприклад, бажаного провайдера і метадані ключ—значення.

Одна SoS, що працює під управлінням одного набору обов'язкових базових систем, часто називається локальною хмарою АНФ. Ці локальні хмари можуть бути з'єднані одна з одною через системи Gateway і Gatekeeper [55], які належать до підтримуючих базових систем.

Система Gatekeeper відповідає за ретрансляцію запитів на виявлення сервісів з однієї локальної хмари в іншу в процесі узгодження міжхмарних сервісів. Після успішного узгодження задіюється система Gateway і створюється тунель між локальними хмарами. Багаторівневі хмари АНФ можуть бути організовані ієрархічно, наприклад, на хмари глобального рівня, локальні хмари на рівні сайту і навіть хмари пристроїв або осередків.

Підсумовуючи, процес реєстрації постачальників і споживачів, авторизації сторін, організації і, нарешті, забезпечення взаємодії систем на локальному рівні в АНФ проілюстровано на рисунку 3.4. Тут зображено метод динамічної оркестрації. Послідовність складається з наступних кроків:

- 1) Надавач і споживач послуг підключаються до основної системи Реєстру послуг і реєструються.
- 2) Система авторизації інформується про права доступу до нової послуги.
- 3) Споживач послуги запитує у Оркестратора відповідну кінцеву точку надання послуги. Маючи можливість вказати декілька атрибутів пошуку, споживач може бути впевненим, що отримає адресу потрібного провайдера.
- 4) Оркестратор шукає в Реєстрі послуг збіги за всіма зазначеними атрибутами. Якщо він знаходить один або декілька, він перевіряє, чи має споживач дозвіл на їх використання в системі авторизації.

5) Споживач отримує список відповідних провайдерів, які йому дозволено споживати, і може розпочати взаємодію.

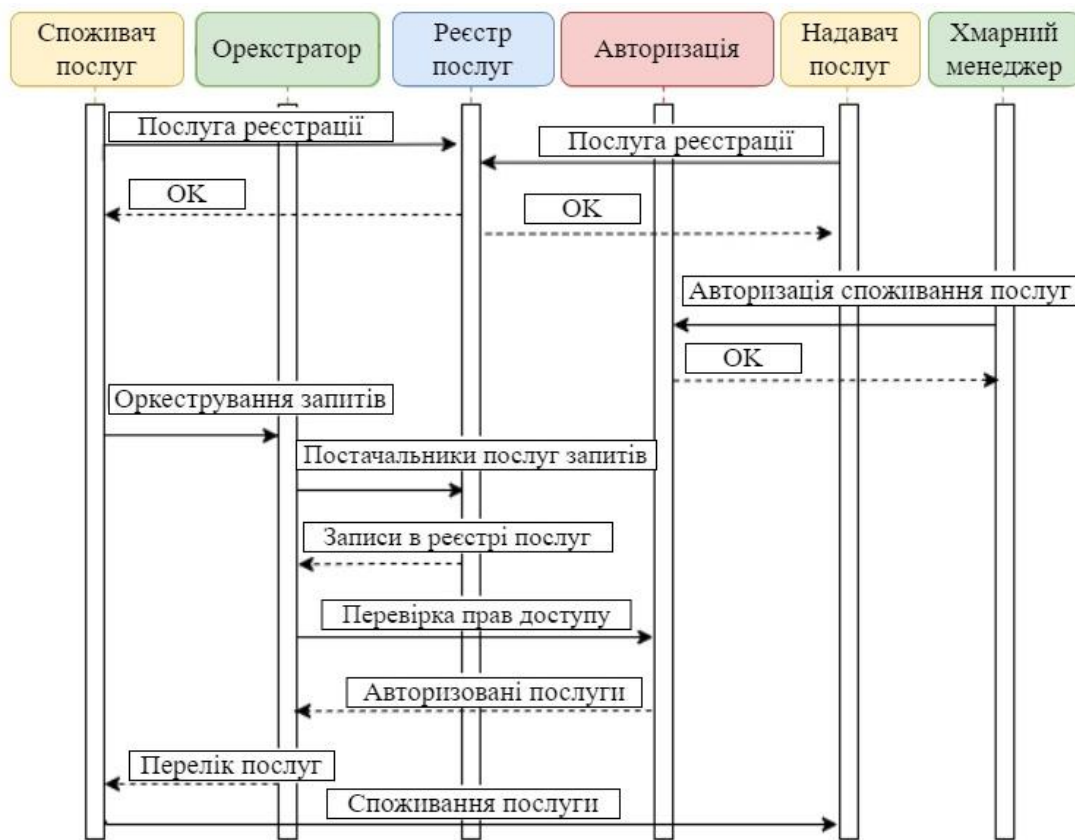


Рисунок 3.4 – Перед споживанням послуги динамічна оркестрація послуг АНФ вимагає, щоб споживачі та постачальники були спочатку зареєстровані та авторизовані один для одного.

3.4 Граничні шлюзи та програмне забезпечення

На шлюзах розміщуються сервіси, такі як сховище даних, зареєстроване в АНФ, що надає послугу (HTTPS) REST для зберігання отриманих повідомлень у локальній базі даних. В якості моделі даних використовується відкрита модель даних MIMOSA, яка є онтологією для визначення і управління експлуатацією, технічним обслуговуванням за станом (ТОС) і прогнозованим технічним обслуговуванням (PdM) на основі даних і метаданих. Крім того, на

периферійних шлюзах також розміщуються служби трансляції протоколів зв'язку, зареєстровані як служби АНФ, наприклад, для передачі повідомлень MQTT в REST або навпаки, щоб поліпшити сумісність пристроїв IoT і сервісів застосунків.

Легкі периферійні пристрої, є АНФ–сумісними споживачами послуг для вищезгаданого сервісу зберігання даних, а також інших сервісів, що дотримуються того ж API та інформаційної моделі. Вони запитують оркестрування від АНФ, яка шукає зареєстрованих і авторизованих постачальників послуг для конкретного споживача на основі динамічних правил, визначених споживачем.

3.5 Периферійні пристрої та виміри

Першим кроком в інтеграції існуючої платформи IoT в АНФ буде визначити її як єдину систему з декількома інтерфейсами. Однак у АНФ інструменти і застосунки, пропоновані платформою IoT, повинні в кінцевому підсумку сприйматися як повністю незалежні сервіси, програмно конфігуровані і індивідуально доступні, а також легко взаємозамінні з іншими аналогічними сервісами. До таких інструментів відносяться, наприклад, сховища даних для великих обсягів інформації та історичних даних, аналіз даних, візуалізація даних, сигналізація та події, звіти, переадресація даних (наприклад, з одного каналу зв'язку або протоколу на інший), а також управління та контроль пристроїв, включаючи застарілі пристрої. Метою інтеграції різних інструментів платформи IoT в АНФ має бути створення гнучкості вибору і динамічної заміни інструментів і застосунків, пропонованих конкретною платформою або виробником, з окремими аналогічними або агрегованими компонентами, пропонованими практично будь-яким іншим виробником. З точки зору АНФ, це вимагає лише того, щоб платформи IoT оновлювали службу авторизації власною інформацією, яка потім зберігається і передається за запитом АНФ.

Платформа IoT, інтегрована в цю реалізацію, є хмарною і може бути розгорнута в будь-якому середовищі. Це повний набір інструментів і платформа IoT, яка дозволяє створювати веб-, мобільні, хмарні та звітні застосунки за лічені хвилини за допомогою простих у використанні інструментів, починаючи від перетягування контенту і закінчуючи підключенням за принципом «підключи і працюй». Спочатку для інтеграції платформи IoT з АНФ був використаний більш простий підхід, тобто було створено єдине визначення системи з окремими інтерфейсами для деяких пропонованих інструментів, замість того, щоб трансформувати платформу в окремі блоки, як того вимагає належна архітектура АНФ.

3.6 Висновок до третього розділу

В результаті аналізу обширного кола досліджень розглядаються основні характеристики, контексти, можливості та виклики КФС. Особливо важливим є оцінка функціональності КФС як соціотехнічних систем, що інтегрують різноманітні технологічні рішення та управлінські практики для створення стійкої виробничої цінності. Архітектурний огляд КФС підкреслює їхній вплив на створення гнучких, адаптивних та інтегрованих виробничих систем, що сприяє трансорганізаційній інтеграції та формуванню альянсів. Отже, промислові КФС відіграють ключову роль у втіленні цілей Індустрії 4.0, пропонуючи стратегічні можливості для інновацій та збільшення ефективності виробництва через високий рівень автоматизації та інтеграції даних.

Аналіз великих масивів даних дозволив розширити концептуальні рамки, існуючі в літературі, і зосередити увагу на ролі КФС у промислових архітектурах. Відмічено, що попередні дослідження переважно мали технічний характер, тоді як сучасні тенденції вимагають більшої уваги до бізнес-перспектив та впровадження інформаційних систем. Нові знання, які надає це дослідження, підкреслюють необхідність подальшої інтеграції технологій і соціальних аспектів для оптимізації створення вартості в Індустрії 4.0.

РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Питання щодо безпеки життєдіяльності

Тема кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр» присвячена аналізу кіберфізичних систем для промислових IoT-застосунків Індустрії 4.0, тому доцільно розглянути питання з вимог електробезпеки до приміщень з ЕОМ.

Характерною особливістю науково-технічного прогресу на сучасному етапі є створення автоматизованих систем управління на основі впровадження електронно-обчислювальної техніки, наслідками чого є:

- збільшення кількості об'єктів і їх параметрів, якими необхідно управляти;
- розвиток системи дистанційного управління об'єктами, про динаміку яких судять на основі сприйнятих сигналів від засобів відображення інформації;
- ускладнення і збільшення швидкості перебігу виробничих процесів;
- зміни в умовах праці;
- зміни в структурі і характері трудової діяльності, поява професії оператора, основними функціями якого є управління, налагодження і контроль роботи різноманітних автоматизованих систем;
- створення різних типів систем «людина-машина», функціонування яких залежить від взаємодії технічних пристроїв і діяльності людини в єдиному контурі регулювання.

Під системою «людина—машина» розуміють систему, яка включає людину-оператора (групу операторів) і сукупність технічних засобів, за допомогою яких здійснюється трудова діяльність. За структурою машинного компонента системи «людина-машина» можуть бути різного рівня складності:

- інструментальні системи «людина—машина», в яких технічними пристроями є інструменти і прилади;

- прості системи «людина—машина», які включають стаціонарні і нестаціонарні технічні пристрої і людину, що використовує ці пристрої;

- складні системи «людина—машина», в яких людина управляє сукупністю технологічно взаємопов'язаних, але різних за функціональним призначенням апаратів, пристроїв і машин. Керування технологічним процесом забезпечується локальними системами автоматичного управління;

- система «людина—машина» у вигляді системотехнічних комплексів. Це складні системи, в яких людина взаємодіє не тільки з технічними пристроями, але й іншими людьми. Системотехнічні комплекси можна подати як ієрархію більш простих людино-машинних систем.

За типом взаємодії людини і машини виділяються системи неперервної та епізодичної взаємодії. Незалежно від рівня автоматизації системи «людина—машина» основною ланкою є людина, яка ставить мету, планує, направляє і контролює весь процес її функціонування. Особливості діяльності оператора такі:

- керування великою кількістю об'єктів і параметрів, що зумовлює значні навантаження на нервово-психічні функції;

- сприймання, переробка інформації і прийняття рішень є суттю діяльності;

- необхідність декодування інформації, отриманої в закодованому вигляді від приладів, і співвіднесення її зі станом реального процесу або об'єкта;

- висока точність дій і швидкість прийняття рішень та здійснення управлінських функцій;

- висока відповідальність за дії і прийняті рішення;

- висока готовність до екстрених дій;

- обмежена рухова активність, незначні м'язові навантаження;

- сенсорна монотонія або політонія;

- сенсорні, емоційні та інтелектуальні перенавантаження.

Ефективність роботи оператора, як і всієї системи в цілому, залежить від раціонального розподілу функцій між людиною і машиною, виходячи з врахування їх переваг і обмежень.

В одних випадках можливості людини набагато більші, ніж у машини, в інших, навпаки, машина має переваги над людиною. Так, людина здатна працювати в несподіваних ситуаціях, їй властива висока гнучкість і адаптивність до мінливих зовнішніх впливів, може працювати по багатьох програмах. Для машини неможливо запрограмувати всі випадковості; їй властиві мала гнучкість і висока ціна багатоваріантної роботи. Людина здатна створити повне уявлення про події, явища за неповної інформації. У машини така можливість обмежена. Людина має великі можливості для вибору способів дії, може швидко використовувати резерви, виправляти помилки. У машини ці можливості обмежені. В той же час у людини обмежена «пропускна здатність» щодо сприймання і переробки інформації. У машини — навпаки. У людини зменшується працездатність внаслідок розвитку втоми, розсіюється увага, з'являється різні емоційні стани і переживання. Машина має практично постійну роботоздатність. Людина порівняно повільно і неточно виконує обчислювальні операції, в той час як для машини характерні висока швидкість і точність обчислень. В зв'язку з цим необхідна автоматизація тих функцій, які можуть бути виконані без участі людини. За людиною залишаються функції щодо прийняття рішень, що і зумовлює більшу ефективність праці людини порівняно з роботою автоматичних пристроїв. Мислячий оператор посідає центральне місце у великих системах управління.

До взаємодії людини і технічних засобів ставляться підвищені вимоги, що вимагає пристосування техніки до людини (конструювання машин з врахуванням людських можливостей) і людини до машини (добір і підготовка спеціалістів). Зазначені особливості операторської праці дозволяють виділити її в специфічний вид професійної діяльності, основні етапи якої такі.

— Сприймання інформації щодо об'єктів керування та навколишнього середовища, яка важлива для розв'язання завдань, поставлених перед системою

«людина-машина». Для цього оператор повинен помітити сигнали, виділити з їх сукупності найбільш важливі та розшифрувати. Внаслідок цих дій у оператора формується попереднє уявлення про стан керованого об'єкта. Якість сприймання інформації залежить від типу і кількості індикаторів, організації інформаційного поля, характеристик інформації.

— Оцінка і переробка інформації. На цьому етапі порівнюються задані і реальні режими роботи системи, здійснюється аналіз та узагальнення інформації, виділяються критичні об'єкти і ситуації. На основі вже відомих критеріїв важливості і терміновості встановлюється черговість обробки інформації. На оцінку і переробку інформації впливають спосіб кодування, обсяг і динаміка змін в системі, а також відповідність обсягів інформації можливостям пам'яті і мислення оператора.

— Прийняття рішення про необхідні дії на основі проведеного аналізу та оцінки інформації, а також на основі інших відомостей про мету і умови роботи системи, можливі способи дії, наслідки правильних і неправильних рішень. Ефективність прийнятого рішення залежить від типу задачі, складності логічних умов, алгоритму та кількості можливих варіантів рішення.

— Реалізація прийнятого рішення шляхом виконання певних дій або видачі відповідних розпоряджень. На цьому етапі окремими діями є перекодування прийнятого рішення в машинний код, пошук потрібного органу керування і маніпуляції з ним тощо. Виконання рухів залежить від кількості органів керування, їх типу і способів розміщення.

На кожному етапі необхідний контроль власних дій, який може бути інструментальним або візуальним, що забезпечує надійність роботи оператора. Перші два етапи називають отриманням інформації, інші два — її реалізацією. Отримання інформації відбувається через сприймання оператором інформаційної моделі об'єкта керування, тобто різних носіїв інформації. Після декодування сприйнятих сигналів формується логічне знання про керований процес, яке називають концептуальною моделлю. Концептуальна модель дає можливість операторові поєднувати в єдине ціле окремі частини керованого

процесу і на основі прийнятого рішення здійснити ефективні керівні дії, тобто реалізувати отриману інформацію.

Незважаючи на загальні риси діяльності оператора, можна виділити окремі види операторської праці, для яких характерні свої особливості.

Оператор-технолог безпосередньо включений в технологічний процес. Працює переважно в режимі негайного обслуговування, тобто слідує, контролює і регулює технологічний процес з метою підтримання його в заданих межах. Переважаючими є керівні дії, виконання яких регламентується інструкціями. Останні містять повний набір ситуацій і рішень. До цього типу відносяться оператори технологічних ліній, оператори по прийняттю і переробці інформації.

Оператор-спостерігач (контролер, диспетчер). В його діяльності важливе значення мають інформаційні та концептуальні моделі, а також процеси прийняття рішень. Керівні дії дещо простіші. Може працювати в режимі відкладеного обслуговування. Сюди належать оператори радіолокаційних станцій, диспетчери на різних видах транспорту.

Оператор-дослідник в значно більшій мірі використовує понятійний апарат мислення і досвід, закладені в концептуальну модель. Органи керування мають менше значення, а інформаційні моделі, навпаки, велике. Сюди належать користувачі обчислювальних систем, дешифрувальники різних об'єктів.

Оператор-маніпулятор, в діяльності якого велике значення має сенсомоторна координація і моторні (рухові) навички. Механізми моторної діяльності основні, хоча використовується і апарат понятійного та образного мислення. Функціями оператора-маніпулятора є керування роботами, машинами, транспортними засобами і т. ін.;

Оператор-керівник. Головну роль в діяльності відіграють інтелектуальні процеси. Належать організатори, керівники різних рівнів, особи, які приймають відповідальні рішення в людино-машинних комплексах і володіють знаннями, досвідом, інтуїцією.

Поведінка оператора в екстремальних умовах є проявом і результатом психологічної готовності до діяльності. Розрізняють загальну і ситуативну (як стан) готовність. Загальна готовність являє собою раніше набуті знання, навички, вміння, мотиви щодо виконання певної діяльності. Тимчасовий стан готовності — це актуалізація всіх сил, психологічних можливостей для успішних дій в даний момент. Готовність до успішних дій в екстремальних ситуаціях залежить від особистісних властивостей оператора, рівня його підготовки і повноти інформації про стан керованого об'єкта.

Емоційне напруження оператора після виконання особливо відповідальної роботи супроводжується психічним виснаженням (функціональною астенією) різного ступеня. Відмічаються слабкість процесів збудження (недостатня рухливість, пасивність, сповільнення мислення) або гальмування (помірно виражений рух, неглибокий аналіз і оцінка подій). Такий стан може тривати протягом 1...3 год (рідше добу), після чого з'являються головні болі, стомленість, апатія, неглибокий сон. Відмічаються погіршення пам'яті, сприймання. Тривалі і сильні емоційні напруження оператора негативно впливають на його діяльність, часто призводять до нервово-емоційних зривів. Основними напрямками зменшення емоційного напруження і підвищення надійності роботи оператора є науково обґрунтований професійний відбір і тренування, врахування і погодження особливостей конструкцій машин з можливостями людини при проектуванні людино-машинних систем; раціональна організація робочого місця.

4.2 Питання з основ охорони праці

Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів

Основними складовими безпеки праці на виробництві є:

- безпечне виробниче обладнання;
- безпечні технологічні процеси;

- організація безпечного виконання робіт.

ГОСТ 12.2.003–91.— основний нормативний документ з загальних вимог безпеки до виробничого обладнання за виключенням обладнання, яке є джерелом іонізуючих випромінювань.

Вимоги безпеки до виробничого обладнання конкретних груп, видів, моделей розробляються відповідно до вимог ГОСТ 12.2.003–91 з урахуванням призна-чення, виконання та умов його експлуатації.

- Безпека виробничого обладнання забезпечується:
- вибором принципів дії, джерел енергії, параметрів робочих процесів;
- мінімізацією енергії, що споживається чи накопичується;
- застосуванням вмонтованих в конструкцію засобів захисту та інформації про можливі небезпечні ситуації;
- застосуванням засобів автоматизації, дистанційного керування та контролю;
- дотримання ергономічних, обмеженням фізичних і нервово психологічних навантажень працівників.

Виробниче обладнання, при роботі як самостійно, так і в складі технологічних комплексів, повинно відповідати вимогам безпеки на протязі всього періоду його експлуатації.

Виробниче обладнання, робота якого супроводжується виділенням шкідливих речовин чи мікроорганізмів або пожежо– та вибухонебез-печних речовин, повинно включати вмонтовані пристрої для локалізації цих виділень. При відсутності таких пристроїв, в конструкції обладнання мають бути передбачені місця для підключення автономних пристроїв локалізації виділень. За необхідності згадані пристрої мають бути виконані з урахуванням чинних вимог щодо стану повітря робочої зони та захисту довкілля.

Якщо виробниче обладнання являється джерелом шуму, ультра та інфразвуку, вібрації, виробничих випромінювань (електромагнітних, лазерних тощо), то воно повинно бути виконано таким чином, щоб дія на працюючих

перерахованих шкідливих виробничих факторів не перевищувала меж, встановлених відповідними чинними нормативами.

Однією із складових безпеки виробничого обладнання є конструкція робочого місця, його розміри, взаємне розміщення органів управління, засобів відображення інформації, допоміжного обладнання тощо. При розробці конструкції робочого місця слід дотримуватись вимог ГОСТ 12.2.032–78, ГОСТ12.2.033–84, ГОСТ12.2.049–80, ГОСТ12.2.061–81 та інших чинних нормативів. При цьому розміри робочого місця і його елементів мають забезпечувати виконання операцій в зручних робочих позах і не ускладнювати рухи працюючих. Конструкція крісла і підставки для ніг мають відповідати ергономічним вимогам.

Повне чи часткове припинення енергопостачання з наступним його відновленням, а також пошкодження мережі управління енергопостачанням не повинно призводити до виникнення небезпечних ситуацій.

Засоби захисту, що входять в конструкцію виробничого обладнання, повинні: забезпечувати можливість контролю їх функціонування; виконувати своє призначення безперервно в процесі роботи обладнання; діяти до повної нормалізації відповідного небезпечного чи шкідливого фактора, що спричинив спрацювання захисту; зберігати функціонування при виході із ладу інших засобів захисту. За необхідності включення засобів захисту до початку роботи виробничого обладнання, схемою управління повинні передбачатись відповідні блокування тощо.

ГОСТ 12.3.002–75.— чинний нормативний документ з загальних вимог безпеки до виробничих процесів.

Безпека виробничих процесів визначається, у першу чергу безпекою обладнання, яка забезпечується шляхом урахування вимог безпеки при складанні технічного завдання на його проектування, при розробці ескізного й робочого проекту, випуску та випробуваннях випробного зразка й передачі його у серійне виробництво згідно ГОСТ 15.001—73 «Разработка и постановка продукции на производство. Основные положения».

Основними вимогами безпеки до технологічних процесів є: усунення безпосереднього контакту працюючих з вихідними матеріалами, заготовками, напівфабрикатами, готовою продукцією та відходами виробництва, що є вірогідними чинниками небезпек; заміна технологічних процесів та операцій, що пов'язані з виникненням небезпечних та шкідливих виробничих факторів, процесами і операціями, за яких зазначені фактори відсутні або характеризуються меншою інтенсивністю; комплексна механізація та автоматизація виробництва, застосування дистанційного керування технологічними процесами і операціями при наявності небезпечних та шкідливих виробничих факторів; герметизація обладнання; застосування засобів колективного захисту працюючих; раціональна організація праці та відпочинку з метою профілактики монотонності й гіподинамії, а також обмеження важкості праці; своєчасне отримання інформації про виникнення небезпечних та шкідливих виробничих факторів на окремих технологічних операціях (системи отримання інформації про виникнення небезпечних та шкідливих виробничих факторів необхідно виконувати за принципом пристроїв автоматичної дії з виводом на системи попереджувальної сигналізації); впровадження систем конт-ролю та керування технологічним процесом, що забезпечують захист працюючих та аварійне відключення виробничого обладнання; своєчасне видалення і знешкодження відходів виробництва, що є джерелами небезпечних та шкідливих виробничих факторів, забезпечення пожежної й вибухової безпеки.

Розташування виробничого обладнання, вихідних матеріалів, заготовок, напівфабрикатів, готової продукції та відходів виробництва у виробничих приміщеннях і на робочих місцях не повинно являти собою небезпеку для персоналу. Відстані між одиницями обладнання, а також між обладнанням та стінами виробничих приміщень, будівель і споруд повинна відповідати вимогам діючих норм технологічного проектування, будівельним нормам та правилам.

До факторів, що визначають умови праці, відносяться також раціональні методи технології і організації виробництва. Зокрема, велику роль відіграє зміст праці, форми побудови трудових процесів, ступінь спеціалізації працюючих при виконанні виробничих процесів, вибір режимів праці та відпочинку, дисципліна праці, психологічний клімат у колективі, організація санітарного й побутового забезпечення працюючих відповідно до

До осіб, які допущені до участі у виробничому процесі, ставляться вимоги щодо відповідності їх фізичних, психофізичних і, в окремих випадках, антропометричних даних характеру роботи. Перевірка стану здоров'я працюючих має проводитися як при допуску їх до роботи, так і періодично згідно з чинними нормативами. Періодичність контролю за станом їх здоров'я повинна визначатися залежно від небезпечних та шкідливих факторів виробничого процесу в порядку, встановленому Міністерством охорони здоров'я.

У автоматизованому виробництві необхідне також суворе виконання вимог безпеки під час ремонту й налагодження автоматичних машин та їх систем. Одним з перспективних напрямків комплексної автоматизації виробничих процесів є використання промислових роботів.

4.3 Висновок до четвертого розділу

Дослідження, проведене в межах кваліфікаційної роботи, присвячене аналізу кіберфізичних систем для промислових IoT-застосунків Індустрії 4.0, виявило важливість забезпечення електробезпеки в приміщеннях з електронно-обчислювальними машинами (ЕОМ). На сучасному етапі науково-технічного прогресу автоматизовані системи управління стають невід'ємною частиною виробничих процесів, що зумовлює необхідність врахування численних аспектів взаємодії людини і технічних засобів.

Особлива увага була приділена системам "людина-машина", які виступають ключовим елементом сучасного виробництва. Визначено різні типи

таких систем, залежно від складності взаємодії між оператором та технічними засобами, та наведено характеристики діяльності операторів у різних умовах. Важливою складовою є раціональний розподіл функцій між людиною та машиною, що дозволяє забезпечити ефективність та надійність роботи.

Основними вимогами безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів є безпечність конструкції, мінімізація енергії, що споживається, впровадження засобів захисту та автоматизації, а також врахування ергономічних принципів. Безпека виробничих процесів забезпечується також за рахунок комплексної механізації, автоматизації, застосування дистанційного керування та впровадження систем контролю та керування.

Таким чином, забезпечення електробезпеки в умовах впровадження кіберфізичних систем для промислових IoT-застосунків є критично важливим для успішної інтеграції технологій Індустрії 4.0 в сучасне виробництво. Підвищення безпеки та ефективності роботи операторів, а також раціональна організація праці сприятимуть подальшому розвитку автоматизованих систем управління та підвищенню продуктивності промислових процесів.

ВИСНОВКИ

У цій роботі проведено всебічний аналіз кіберфізичних систем (КФС) та їх застосування в контексті промислових IoT-застосунків, що є основою Індустрії 4.0.

Перший розділ роботи детально розглядає інтеграцію концепції КФС у різноманітні наукові та практичні дисципліни. Відзначено, що КФС виступають як потужний інструмент для оптимізації та автоматизації виробничих процесів, моніторингу та управління в реальному часі через збір і аналіз великих обсягів даних. Успішне впровадження КФС значною мірою залежить від технічного забезпечення, програмного інтегрування та врахування соціальних і організаційних аспектів. У промисловому контексті КФС значно підвищують ефективність і адаптивність виробничих систем, що є ключовим для трансформації підприємств у рамках Індустрії 4.0.

Другий розділ акцентує увагу на практичних аспектах застосування КФС, зокрема, через два промислові приклади: моніторинг виробничих збірок і моніторинг стану при дробленні гірських порід. Показано, що КФС, об'єднуючи різноманітні ресурси і процеси, створюють складні системи систем, що базуються на використанні даних для забезпечення ефективності та стабільності операцій. Важливу роль відіграють хмарні та граничні обчислення, які оптимізують обробку великих обсягів даних і знижують витрати на передачу даних. Однак, питання інтеграції та стандартизації залишаються викликами, що потребують вирішення для повної реалізації потенціалу КФС у промислових застосунках.

Третій розділ присвячено аналізу основних характеристик, контекстів, можливостей та викликів КФС як соціотехнічних систем. Відзначено, що КФС сприяють створенню гнучких, адаптивних та інтегрованих виробничих систем, які підтримують трансорганізаційну інтеграцію та формування альянсів. Аналіз великих масивів даних розширює концептуальні рамки, наявні в літературі, і зосереджує увагу на ролі КФС у промислових архітектурах. Наголошено на

необхідності подальшої інтеграції технологій і соціальних аспектів для оптимізації створення вартості в Індустрії 4.0.

Загалом, дослідження підкреслює стратегічну важливість КФС для промислових підприємств, пропонуючи інноваційні рішення для підвищення ефективності та адаптивності виробництва. Впровадження КФС у промислових IoT-застосунках відкриває нові горизонти для досліджень і практичного застосування, що є критичним для досягнення цілей Індустрії 4.0..

В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр»:

- Подано аналіз елементів кіберфізичних систем.
- Розглянуто стан досліджень КФС Індустрії 4.0.
- Проаналізовано методологію дослідження.

В другому розділі кваліфікаційної роботи:

- Досліджено промислові виробничі системи.
- Обґрунтовано архітектуру платформи IIoT.
- Сформовано короткий огляд вимог IIoT.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи:

- Запропоновано кіберфізичні системи в індустрії 4.0.
- Спроектовано архітектуру периферійних пристроїв та вимірів.

У розділі «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» ... Висвітлено особливості безпечної роботи і взаємодії систем «людина-машина» а також вимоги безпеки для операторів автоматизованих виробництв.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- 1 Broo, Didem Gürdür, Ulf Boman, and Martin Törngren. "Cyber–physical systems research and education in 2030: Scenarios and strategies." *Journal of Industrial Information Integration* 21 (2021): 100192.
- 2 Jahromi, Amir Abiri, and Deepa Kundur. "Fundamentals of cyber–physical systems." *Cyber–Physical Systems in the Built Environment* (2020): 1–13.
- 3 Zhou, Xugui, et al. "Hybrid knowledge and data driven synthesis of runtime monitors for cyber–physical systems." *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing* (2023).
- 4 Zhang, Kunwu, et al. "Advancements in industrial cyber–physical systems: An overview and perspectives." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 19.1 (2022): 716–729.
- 5 Samad, Tariq. "Human-in-the-loop control and cyber–physical–human systems: applications and categorization." *Cyber–physical–human systems: fundamentals and applications* (2023): 1–23.
- 6 Zhang, Kunwu, et al. "Advancements in industrial cyber–physical systems: An overview and perspectives." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 19.1 (2022): 716–729.
- 7 Ntentos, Evangelos, et al. "Decision–Making Support for Data Integration in Cyber–Physical–System Architectures." *International Conference on Service–Oriented Computing*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023.
- 8 Neureiter, Christian, and Christoph Binder. "A domain–specific, model based systems engineering approach for cyber–physical systems." *Systems* 10.2 (2022): 42.
- 9 Pasandideh, Shabnam, Pedro Pereira, and Luis Gomes. "Cyber–physical–social systems: taxonomy, challenges, and opportunities." *IEEE Access* 10 (2022): 42404–42419.

- 10 Alshalalfah, Abdel-Latif, Otmane Ait Mohamed, and Samir Ouchani. "A framework for modeling and analyzing cyber-physical systems using statistical model checking." *Internet of Things* 22 (2023): 100732.
- 11 Horváth, Imre. "Designing next-generation cyber-physical systems: Why is it an issue?." *Journal of Integrated Design and Process Science Preprint* (2022): 1–33.
- 12 Queiroz, Rui, Tiago Cruz, and Paulo Simões. "Testing the limits of general-purpose hypervisors for real-time control systems." *Microprocessors and Microsystems* 99 (2023): 104848.
- 13 Heikkilä, Jussi, Julius Rissanen, and Timo Ali-Vehmas. "Coopetition, standardization and general purpose technologies: A framework and an application." *Telecommunications Policy* 47.4 (2023): 102488.
- 14 Suleiman, Zhanybek, et al. "Industry 4.0: Clustering of concepts and characteristics." *Cogent Engineering* 9.1 (2022): 2034264.
- 15 Sekaran, Ramesh, et al. "Ant colony resource optimization for Industrial IoT and CPS." *International Journal of Intelligent Systems* 37.12 (2022): 10513–10532.
- 16 Khalid, Azfar, et al. "Understanding vulnerabilities in cyber physical production systems." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 35.6 (2022): 569–582.
- 17 Jiang, Yuchen, et al. "Secure data transmission and trustworthiness judgement approaches against cyber-physical attacks in an integrated data-driven framework." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 52.12 (2022): 7799–7809.
- 18 Lakhan, Abdullah, et al. "Blockchain-enabled cybersecurity efficient IIoT cyber-physical system for medical applications." *IEEE Transactions on Network Science and Engineering* (2022).
- 19 Biesinger, Florian, et al. "A digital twin for production planning based on cyber-physical systems: A Case Study for a Cyber-Physical System-Based Creation of a Digital Twin." *Procedia CIRP* 79 (2019): 355–360.

20 Fang, Pengcheng, et al. "Data analytics–enable production visibility for Cyber–Physical Production Systems." *Journal of manufacturing systems* 57 (2020): 242–253.

21 Meesublak, Koonlachat, and Tosapol Klinsukont. "A cyber–physical system approach for predictive maintenance." *2020 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)*. IEEE, 2020.

22 Ma, Shuaiyin, et al. "Energy–cyber–physical system enabled management for energy–intensive manufacturing industries." *Journal of cleaner production* 226 (2019): 892–903.

23 Oks, Sascha Julian, et al. "Cyber–physical systems in the context of industry 4.0: A review, categorization and outlook." *Information Systems Frontiers* (2022): 1–42.

24 Afrizal, A., B. Mulyanti, and I. Widiaty. "Development of Cyber–Physical System (CPS) implementation in industry 4.0." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 830. No. 4. IOP Publishing, 2020.

25 Pivoto, Diego GS, et al. "Cyber–physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review." *Journal of manufacturing systems* 58 (2021): 176–192.

26 Gürdür, Didem, and Fredrik Asplund. "A systematic review to merge discourses: Interoperability, integration and cyber–physical systems." *Journal of Industrial information integration* 9 (2018): 14–23.

27 Bellini, Emanuele, et al. "Resilience learning through self adaptation in digital twins of human–cyber–physical systems." *2021 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR)*. IEEE, 2021.

28 Yohanandhan, Rajaa Vikhram, et al. "Cyber–physical power system (CPPS): A review on modeling, simulation, and analysis with cyber security applications." *IEEE Access* 8 (2020): 151019–151064.

29 Khalid, Faiq, Semeen Rehman, and Muhammad Shafique. "Overview of security for smart cyber–physical systems." *Security of Cyber–Physical Systems: Vulnerability and Impact* (2020): 5–24.

- 30 Milne, Alexander JM, Arnold Beckmann, and Pardeep Kumar. "Cyber–physical trust systems driven by blockchain." *Ieee Access* 8 (2020): 66423–66437.
- 31 Kaur, Maninder Jeet, Sadia Riaz, and Arif Mushtaq. "Cyber–physical cloud computing systems and internet of everything." *Principles of Internet of Things (IoT) Ecosystem: Insight Paradigm* (2020): 201–227.
- 32 Jimenez, Jaime Ibarra, Hamid Jahankhani, and Stefan Kendzierskyj. "Health care in the cyberspace: Medical cyber–physical system and digital twin challenges." *Digital twin technologies and smart cities* (2020): 79–92.
- 33 Ryalat, Mutaz, Hisham ElMoaqet, and Marwa AlFaouri. "Design of a smart factory based on cyber–physical systems and Internet of Things towards Industry 4.0." *Applied Sciences* 13.4 (2023): 2156.
- 34 Singh, Nitin, et al. "Cyber–physical systems: a bibliometric analysis of literature." *Journal of Intelligent Manufacturing* (2024): 1–37.
- 35 Branco, Dario, et al. "Agents based cyber–physical diffused museums over web interoperability standards." *IEEE Access* (2023).
- 36 Zahid, Maryam, Alessio Bucaioni, and Francesco Flammini. "Model Based Trustworthiness Evaluation of Autonomous Cyber–Physical Production Systems: A Systematic Mapping Study." *ACM Computing Surveys* (2024).
- 37 Müller, Timo, et al. "Architecture and knowledge modelling for self–organized reconfiguration management of cyber–physical production systems." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 36.12 (2023): 1842–1863.
- 38 Ryalat, Mutaz, Hisham ElMoaqet, and Marwa AlFaouri. "Design of a smart factory based on cyber–physical systems and Internet of Things towards Industry 4.0." *Applied Sciences* 13.4 (2023): 2156.
- 39 Wang, Tianyue, et al. "Data Augmentation–Based Manufacturing Quality Prediction Approach in Human Cyber–Physical Systems." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 145.12 (2023).

40 Rojas, Rafael A., and Erwin Rauch. "From a literature review to a conceptual framework of enablers for smart manufacturing control." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104 (2019): 517–533.

41 Lozano, Carolina Villarreal, and Kavin Kathiresh Vijayan. "Literature review on cyber physical systems design." *Procedia manufacturing* 45 (2020): 295–300.

42 Zeng, Jing, et al. "A survey: Cyber–physical–social systems and their system–level design methodology." *Future Generation Computer Systems* 105 (2020): 1028–1042.

43 Passaretti, Daniele, Max Steiger, and Thilo Pionteck. "Enabling plug–and–play in Cyber–Physical Systems using MPSoC–FPGAs." *IEEE Access* (2023).

44 Hästbacka, David, et al. "Dynamic edge and cloud service integration for industrial IoT and production monitoring applications of industrial cyber–physical systems." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 18.1 (2021): 498–508.

45 Ning, Huansheng, et al. "Heterogeneous edge computing open platforms and tools for internet of things." *Future Generation Computer Systems* 106 (2020): 67–76.

46 Lynn, Theo, et al. "The cloud–to–thing continuum: opportunities and challenges in cloud, fog and edge computing." (2020): 161.

47 Garg, Deepak, et al. "Hybrid technique for cyber–physical security in cloud–based smart industries." *Sensors* 22.12 (2022): 4630.

48 Gong, Chao, et al. "Intelligent cooperative edge computing in internet of things." *IEEE Internet of Things Journal* 7.10 (2020): 9372–9382.

49 Rafique, Wajid, et al. "Complementing IoT services through software defined networking and edge computing: A comprehensive survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.3 (2020): 1761–1804.

50 Fraile, Francisco, et al. "Reference models for digital manufacturing platforms." *Applied Sciences* 9.20 (2019): 4433.

51 Fadhlillah, Hafiyyan Sayyid, et al. "Towards heterogeneous multi–dimensional variability modeling in cyber–physical production systems." *Proceedings*

of the 25th ACM International Systems and Software Product Line Conference—Volume B. 2021.

52 Marcu, Ioana, et al. "Arrowhead technology for digitalization and automation solution: Smart cities and smart agriculture." *Sensors* 20.5 (2020): 1464.

53 Hofer, Florian. "Architecture, technologies and challenges for cyber-physical systems in industry 4.0: A systematic mapping study." *Proceedings of the 12th ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*. 2018.

54 Pivoto, Diego GS, et al. "Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review." *Journal of manufacturing systems* 58 (2021): 176–192.

55 Hegedus, Csaba, Pál Varga, and Attila Frankó. "Secure and trusted inter-cloud communications in the arrowhead framework." *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. IEEE, 2018.

56 Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

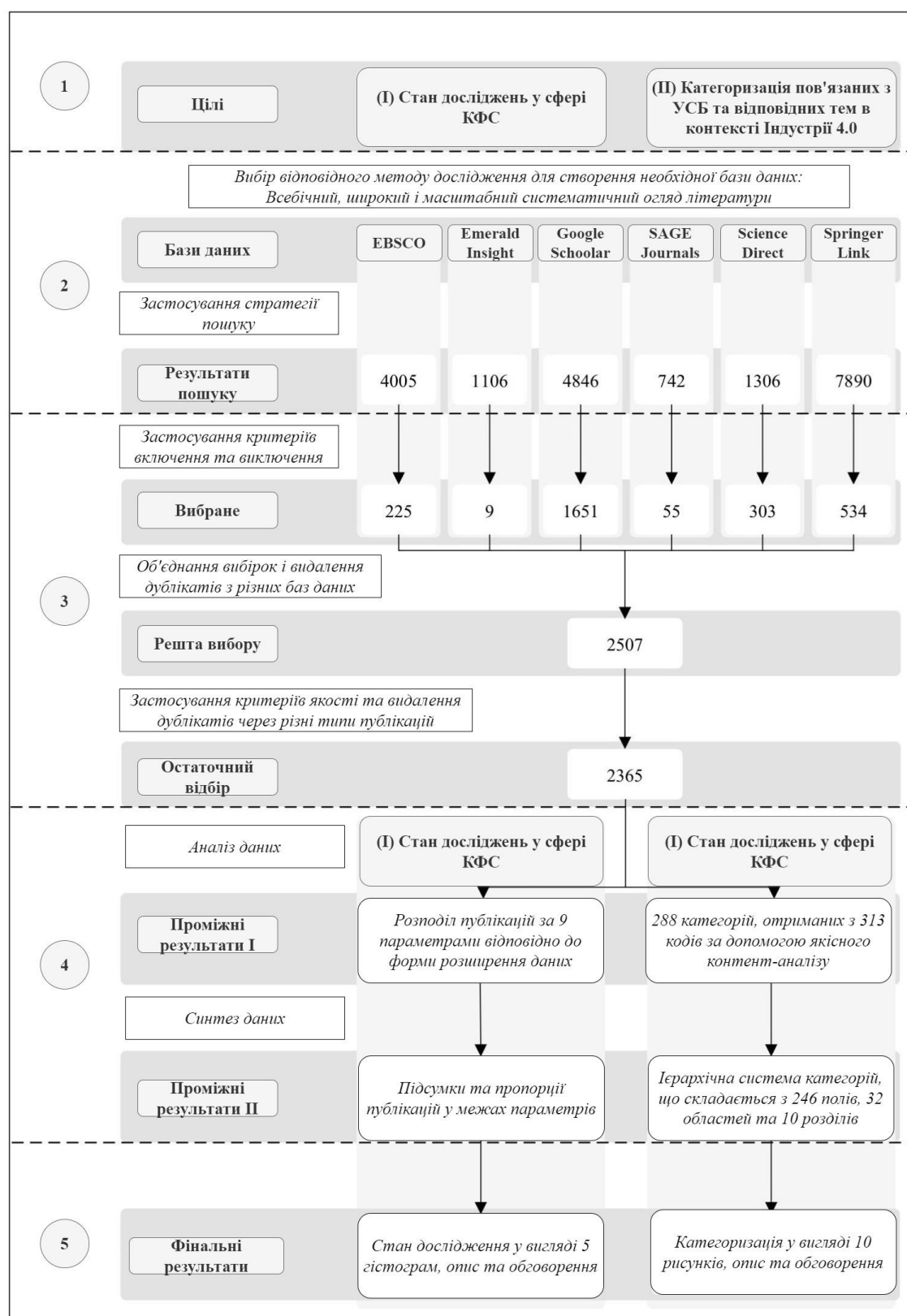
57 Duda, O., Mykytyshyn, A., Mytnyk, M., & Stanko, A. (2020). The network platform cyber-physical systems application for smart buildings air pollution indicators monitoring. *network*, 3.

58 Станько, А. А. (2023). Мережева інформаційно-технологічна платформа супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» (Doctoral dissertation, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя).

59 Kryazhych, O., Itskovych, V., Iushchenko, K., Hrytsyshyna, V., Bruvier, D., Nykytyuk, V., & Bodnarchuk, I. (2023). The use of abstract Moore automaton to control the sensors of a service-oriented alarm and emergency notification network. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 109(1), 111-120.

ДОДАТКИ

Процес систематичного перегляду літератури



Архітектура промислових КФС

