

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**НОВОСЕЛОВ СЕРГІЙ ПАВЛОВИЧ**

УДК 681.513.8:004.896

**РОЗПОДІЛЕНІ САМООРГАНІЗОВАНІ ПРОЦЕСИ КЕРУВАННЯ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ ВИРОБНИЦТВОМ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ  
ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ**

05.13.07 – Автоматизація процесів керування  
технічні науки

**РЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків - 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Осадчий Сергій Іванович**,  
Українська державна льотна академія,  
м. Кропивницький,  
професор кафедри конструкції повітряних суден,  
авіадвигунів та підтримання льотної придатності,  
МОН України

доктор технічних наук, професор,  
**Кошовий Микола Дмитрович**,  
Національний аерокосмічний університет  
«ХАІ», професор кафедри інтелектуальних  
вимірювальних систем та інженерії якості,  
МОН України

доктор технічних наук, професор  
**Удовенко Сергій Григорович**,  
Харківський національний економічний університет  
імені Семена Кузнеця, м. Харків,  
завідувач кафедри інформатики та комп'ютерної  
техніки,  
МОН України

Захист відбудеться «06» жовтня 2025 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14 та на сайті вченої ради ХНУРЕ за адресою: <https://nure.ua/branch/d-64-052-04/informacija-pro-zahist-disertacij>.

Реферат розіслано «05» вересня 2025 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.В. Євсєєв

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність даного дослідження полягає в необхідності підвищення ефективності виробничих процесів на інтелектуальних виробництвах за рахунок впровадження цифрових двійників в систему автоматизованого управління технологічними процесами. Використання технології промислового Інтернету речей в інтеграції з сучасними технологіями зв'язку та обробки великих даних в хмарному середовищі дає можливість впровадити розподілену систему управління інтелектуальним виробництвом для відповідності концепції Industry 4.0 та Industry 5.0. Технологія цифрових двійників передбачає створення віртуальної моделі фізичного об'єкту, процесу або системи, яка може бути використана для моделювання, моніторингу, тестування та прогнозування можливого розвитку подій на основі інформації від розподіленої мережі сенсорів технологічного обладнання.

Проблема розбіжності поведінки фізичної системи та моделі цифрового двійника є критичною при орієнтації архітектури організації інтелектуального виробництва на інтеграцію з технологіями хмарних обчислень. Автоматизована виробнича система має ряд особливостей, що пов'язані зі змінами її властивостей в процесі експлуатації. Цифрова модель технологічних процесів та обладнання в більшості випадків є ідеальною та не враховує процеси старіння обладнання, вплив зовнішніх факторів, сезонні зміни логістичних маршрутів, та інше. В реальних умовах застосування архітектури розподілених систем управління ТП ми можемо спостерігати розбіжності в реакціях фізичної системи та моделі цифрового двійника.

Одним з рішень даної проблеми є створення механізму динамічного оновлення моделі цифрового двійника для зменшення похибки в реакції фізичної системи та віртуальної. Оновлення моделі цифрового двійника в реальному часі розглядається в роботі, як задача її оптимізації. Завдяки синхронізації цифрової моделі з фізичним середовищем цифрові двійники дозволяють зменшити похибки керування, підвищити точність планування, оперативно виявляти відхилення й формувати коригувальні дії.

Аналіз публікацій провідних фахівців в галузі автоматизованих систем керування, кіберфізичних розподілених виробничих систем та цифрових двійників, таких як A. Rettberg, Y. Aksonov, A. Aziz, T. Chen, L. Steinmetz, Невлюдов І.Ш., Филипенко О.І., Удовенко С.Г., Осадчий С.І., Євсєєв В.В., Тімофєєв В.О., Цимбал О.М., Кошовий М.Д., доводять що проблема, яка вирішується в роботі є актуальною у всьому світі.

Таким чином, впровадження цифрових двійників в систему автоматизованого управління технологічними процесами дозволить підвищити ефективність виробничих процесів на інтелектуальних виробництвах.

Успішне впровадження технології цифрових двійників в інтелектуальне виробництво у сполученні з хмарними обчисленнями та машинним навчанням спрямоване на досягнення цілей сталого розвитку, що наближає галузь індустрії до людини, щоб задовольнити потреби сучасного покоління без шкоди для майбутніх поколінь.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась автором на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки. Результати роботи знайшли своє відображення в держбюджетній науково-дослідній роботі «Інтелектуальна багатоцільова мобільна робототехнічна платформа з удосконаленими маніпуляційними можливостями» (№ ДР 0121U109909); «Дослідження та проектування системи дистанційного керування для модернізації бульдозера Caterpillar D6 Dozer D6 LGP для виконання задач з гуманітарного розмінування» (Договір 24-01); «Модернізація системи дистанційного керування бульдозерам Caterpillar D6 Dozer D6 LGP для виконання задач з гуманітарного розмінування» (Договір 24-06); «Автоматизована система підбору компонентів холодильного обладнання для ПП «Хладоюг сервіс»» (Договір 19-07); «Розроблення комплексної системи оперативно-диспетчерського керування виробничим підприємством ТОВ «ЗЕО СОКОЛ»» (Договір 14-04). Здобувач був провідним виконавцем зазначених НДР і є співавтором звітів з НДР.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є вдосконалення методів децентралізованого управління ТП для підвищення ефективності виробничого процесу на інтелектуальному виробництві за рахунок інтеграції цифрових двійників в АСУ.

#### **Задачі дослідження:**

- розробити модель розподіленої АСУ ТП на інтелектуальному виробництві з інтеграцією технології промислового інтернету речей та цифрового двійника виробничого процесу;
- розробити метод децентралізованого управління виробничими процесами із застосуванням цифрових двійників;
- розробити метод синхронізації цифрового двійника з фізичними процесами в АСУ ТП;
- провести дослідження методу інтеграції цифрового двійника в задачу управління ТП;
- розробити метод організації надійного зв'язку в розподіленому виробничому середовищі обміну даними між інтелектуальними засобами автоматизації;
- реалізувати розроблені методи і моделі у вигляді програмних алгоритмів і методик застосування запропонованих рішень для вирішення задачі розподіленого керування виробничими процесами на основі інтеграції цифрових двійників;

– впровадити отримані науково-технічні результати та перевірити їх на практиці.

**Об’єкт дослідження** – процес децентралізованого управління виробничими процесами на інтелектуальному виробництві.

**Предметом дослідження** є розподілена автоматизована система управління АСУ ТП на інтелектуальному виробництві з інтеграцією технології промислового інтернету речей та цифрового двійника виробничого процесу.

**Методи дослідження.** Основними методами дослідження є методи аналізу та синтезу децентралізованих виробничих систем, методи моделювання та теорії автоматичного управління, математичний апарат теорії матриць, методи опису лінійних динамічних систем за допомогою яких проведено моделювання децентралізованої інформаційної системи керування виробничою ділянкою інтелектуального виробництва із застосуванням роботів-маніпуляторів; методи комп’ютерного та імітаційного моделювання за допомогою яких визначено ефективність запропонованих методів.

**Наукова новизна роботи.** У дисертаційній роботі вирішено важливу теоретичну проблему зі створення нових ефективних методів децентралізованого управління виробничими процесами із застосуванням цифрових двійників, а саме, застосування автономних незалежних агентів, що самоорганізуються в комплексні структури для вирішення спільної задачі підвищення якості продукції, що виробляється.

Отримано такі наукові результати:

1. Вперше розроблена модель розподіленої АСК на інтелектуальному виробництві із застосуванням комплексних цифрових двійників, як додаткового компонента загальної системи керування виробничим процесом, що дає змогу забезпечити динамічну реконфігурацію системи керування відповідно до змін виробничих задач, конфігурації обладнання або режимів роботи.

2. Вперше запропоновано метод адаптивного керування технологічними процесами інтелектуального виробництва на основі розподілених кіберфізичних систем із застосуванням технології розповсюдження сигналів погодження, що надає можливість автономним агентам узгоджувати свої цілі, обмінюватись даними в реальному часі та колективно оптимізувати увесь виробничий процес.

3. Вперше запропоновано застосування методу децентралізованого управління кіберфізичною системою на основі розподілених контролерів, що дає змогу описати реальний стан виробничого середовища у випадку, коли результати роботи одного об’єкта керування впливають на параметри роботи іншого.

4. Знайшов подальшого розвитку метод синхронізації моделі цифрового двійника та виробничого процесу кіберфізичної системи на основі ПІД-регуляторів, що надає можливість динамічного оновлення моделі у

відповідності до змін параметрів фізичного процесу для підвищення якості продукції, що виробляється.

5. Дістала подальшого розвитку модель адаптації цифрового двійника під зміни властивостей фізичного об'єкту, що забезпечує підвищення точності віртуальної моделі, адже вона еволюціонує разом з реальним об'єктом в реальному часі.

6. Удосконалено метод моделювання багатофакторних фізичних процесів за рахунок застосування уніфікованих функціональних модулів, що надає можливість створювати моделі цифрових двійників в різних програмних середовищах та інтегрувати їх у хмарні системи симуляції виробничих процесів.

7. Удосконалено метод побудови маршруту розповсюдження сигналів в бездротовій розподіленій сенсорній мережі IoT пристроїв, що надає можливість вирішення задачі адаптації мережі під динамічні зміни архітектури виробничого процесу на інтелектуальному виробництві.

8. Знайшов подальшого розвитку метод локального позиціонування автономного мобільного транспортного засобу на основі BLE міток із застосуванням технології TDOA та даних про RSSI сигналів базових станцій.

9. Знайшов подальшого розвитку метод одночасної локалізації автономного транспортного робота та картографування для побудови карт навколишнього середовища з використанням ROS.

**Практичне значення отриманих результатів** дисертаційної роботи полягає у вирішенні проблеми самоорганізації автономних агентів в процесі виконання спільної виробничої задачі з впровадженням нових методів побудови розподілених систем керування виробничими процесами з використанням цифрових двійників в якості додаткового компонента загальної системи управління.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для вирішення широкого класу прикладних завдань і, перш за все, задач побудови розподіленої сенсорної мережі в системі зв'язку між засобами IoT, побудови складних програмно-технічних комплексів з використанням цифрових моделей засобів автоматизації та виробничих процесів в якості функціональних макетних блоків.

Отримані результати дають змогу:

- в залежності від розміру виробничого підприємства отримати ефект від інтеграції цифрових двійників технологічного процесу та виробничих об'єктів, що коливається в межах від 5 до 8 відсотків від традиційного способу створення конструкторсько-технологічної документації;
- підвищити точність визначення параметрів компонентів технічних засобів автоматизації до 10% відносно табличного методу;
- скоротити витрати на монтаж та налагодження кінцевого об'єкту автоматизації на 3%;

- підвищити точність визначення позиції мобільного автономного робота в просторі на 6% за рахунок впровадження методу комбінації сигналів від різних типів датчиків інерційної системи навігації;

- прискорити процес аналізу інформації від сенсорів розподіленої автоматизованої системи керування виробничими процесами та прийняття рішень;

- підвищити точність цифрової моделі розподіленої виробничої системи що самоорганізується за рахунок впровадження технології цифрових двійників та застосування уніфікованих функціональних модулів.

Результати дисертаційної роботи були апробовані та впроваджені в: освітній процес Харківського національного університету радіоелектроніки (акт впровадження 14 березня 2025р.); ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ» (акт впровадження від 5 березня 2025р.); ТОВ «Харківський завод спеціальних машин» (акт впровадження від 11 лютого 2025р.); ТОВ «ЗН-Автоматика» (акт впровадження від 24 березня 2024р.); ПП «Хладоюг сервіс» (акт впровадження від 30 липня 2020р.).

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота виконана здобувачем особисто. Всі висновки, положення та рекомендації, подані в ній, сформульовано на основі особистих досліджень автора. В дисертації використано праці інших науковців, на які зроблено посилання. З колективних наукових праць у дисертації використано лише авторські ідеї та положення.

У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, ідеї та принципи, що використані в дисертаційному дослідженні, є результатом індивідуальної праці автора, а саме: [1] – запропоновано метод розрахунку середнього часу відгуку для окремих компонентів різних шарів мережі підтримки IoT для оптимізації процесу розвантаження хмарних обчислень; [2] – запропоновано метод децентралізованого керування фізичними процесами на інтелектуальному виробництві з незалежними контролерами і виконавчими пристроями; [3] – запропоновано метод для автоматизації визначення оптимальної конфігурації режимів шлюзу Інтернету речей; [4] – запропоновано метод реалізації цифрової моделі методу порогового розділення при розпізнаванні та відновлення інтерференційного сигналу відбитого від поверхні функціональної електроніки; [5] – запропоновано метод автоматичного аналізу та розподілення інформації на основі цифрової моделі об'єкта; [6] – запропоновано метод створення цифрового двійника конвеєра технологічної лінії для вирішення задачі дистанційного моніторингу стану основних вузлів конвеєра за допомогою середовища розробки технологічного програмного забезпечення Codesys; [7] – запропоновано метод використання цифрового двійника технологічного обладнання в автоматизованій системі керування; [8] – запропоновано метод розподіленого управління інтелектуальним виробництвом з використанням веб-сервісів; [9] – запропоновано метод багатопотокового програмного керування рухом дволанкового маніпулятора з чотирма ступенями вільності; [10] – розроблено метод та конструкція дослідного стенду автоматизованого тестування гнучких

структур, що становлять основу функціональної електроніки, на надійність; [11] – запропоновано метод управління рухом роботизованої платформи на основі міток з QR-кодом для автоматизації процесу переміщення вантажів в складських приміщеннях; [12] – запропоновано алгоритм роботи програмного засобу для автоматизації відділу обліку товарів; [13] – запропоновано метод автоматизації обліку технологічних операцій на виробничому підприємстві; [14] – запропоновано метод автоматизації обліку співробітників на виробництві; [15] – запропоновано метод мультиагентного управління розподіленої мережею виконавчих пристроїв, автономних роботів та верстатів з ЧПК із застосуванням технології розповсюдження сигналів погодження, що надає можливість автономним агентам узгоджувати свої цілі, обмінюватись даними в реальному часі та колективно оптимізувати увесь виробничий процес; [16] – запропонована архітектура розподіленої автоматизованої системи управління технологічним процесом на інтелектуальному заводі з інтеграцією технології промислового інтернету речей та цифрового двійника виробничого процесу; [17] – запропоновано одночасне використання методів лазерного сканування (2D LRF) та глибинного відтворення зображень (RGB-D) для локалізації інтелектуального робота в виробничому просторі та побудови 2.5D мапи середовища; [18] – запропоновано метод локального позиціонування мобільного автономного робота в виробничому середовищі із застосуванням технології BLE на основі даних RSSI, отриманих від базових станцій; [19] – запропоновано метод визначення орієнтації суглобу промислового маніпулятора і дослідження його роботи з метою визначення придатності конструкції для тривалого використання; [20] – запропоновано метод побудови автоматизованої системи для оперативно-диспетчерського управління виробництвом на основі кіберфізичних систем управління; [21] – описано результати дослідження застосування методу контроль якості електричних між'єднань гнучких структур для засобів робототехніки; [22] – запропоновано метод адаптивного керування технологічними процесами інтелектуального виробництва на основі автономних незалежних агентів багатоагентної системи; [23] – запропоновано метод динамічного спостереження за рухомими об'єктами на виробничій території за допомогою розподіленої системи відеоспостереження; [24] – запропоновано метод побудови таблиць маршрутизації для бездротових сенсорних мереж; [24] – запропоновано метод мультиагентного управління ділянкою складання радіоелектронної апаратури на інтелектуальному виробництві; [26] – запропоновано метод контролю монтажних операцій на конвеєрній лінії інтелектуального виробництва із застосуванням системи комп'ютерного зору; [27] – запропоновано метод навігації групи роботів за допомогою хмарного сервісу, який збирає інформацію з датчиків роботизованого обладнання та використовує її для побудови карти робочого простору; [28] – запропоновано метод побудови захищеного шлюзу для розподіленої мережі пристроїв IoT; [29] – проведено моделювання та запропоновано метод вибору оптимальних параметрів шлюзу безпеки для захисту промислового обладнання від

кібератак; [30] – запропоновано метод управління переміщення мобільного робота спеціального призначення з використанням ROS, запропонована архітектура автоматизованої системи управління мобільним роботом; [31] – запропонована концептуальна архітектура об'єднання компонентів автоматизованої системи в єдиний апаратно-програмний комплекс, запропоновано алгоритм роботи програми цифрової моделі системи; [32] – запропоновано метод організації руху інтелектуальних автономних мобільних роботів, який поєднує принцип виділеної смуги руху для транспортних роботів та сітки опорних точок, через які можна прокласти шляхи багатьох можливих траєкторій; [33] – запропоновано метод застосування незалежних процесів для створення цифрової моделі промислового маніпулятора; [34] – запропоновано метод децентралізованого управління роботизованою мобільною платформою з використанням ROS; [35] – запропоновано метод візуальної одометрії для рішення задачі орієнтації мобільної роботизованої платформи в просторі; [36] – запропоновано метод симуляції розповсюдження сигналу в розподілених бездротових сенсорних мережах; [37] – запропоновано метод розподіленого керування об'єктами промислової автоматизації, який побудований відповідно до вимог концепції Індустрії 4.0; [38] – запропоновано використання методу анізотропної фільтрації в процесі розпізнавання зображень; [39] – запропоновано метод визначення місцезнаходження мобільної платформи з використанням базових станцій та навігаційної системи на основі QR-кодів, а також одометричного позиціонування пристрою з використанням тахометрів; [40] – запропоновано метод побудови таблиці маршрутизації, можливість її адаптації залежно від зміни конфігурації мережі; [41] – запропоновано метод локального позиціонування автономного мобільного робота в виробничому приміщенні з використанням радіомодулів DWM1000; [42] – проаналізовано поширені в робототехніці технології бездротової передачі даних, технології використання оптичного каналу для обміну інформацією між різними пристроями; [43] – описані результати дослідження вимог до проєктування компонентів інфокомунікаційних систем на основі гнучких друкованих плат з урахуванням їх електромагнітної сумісності; [44] – описано принцип роботи IoT на інтелектуальному підприємстві та методи застосування хмарних обчислень, а також показано переваги і недоліки їх застосування; [45] – запропоновано метод сортування деталей на виробничій лінії за допомогою маніпулятора з пневматичним захопленням у поєднанні з системою комп'ютерного зору; [46] – запропоновано метод автоматизованого визначення похибки розташування компонентів на платі радіоелектронного модуля після завершення складальної операції; [47] – запропоновано метод створення цифрового двійника модуля вводу аналогових сигналів в технічних засобах автоматизації; [48] – запропоновано метод візуалізації процесу моделювання руху механічних частин промислового маніпулятора у режимі реального часу; [49] – запропоновано метод створення цифрового двійника промислового маніпулятора для розрахунку та візуалізації роботи

маніпулятора, який може бути реалізований будь-якою візуальною мовою програмування; [50] – запропоновано метод управління багатоланковим маніпулятором; [51] – запропоновано метод створення цифрового двійника для вирішення задачі сортування деталей на виробничій лінії; [52] – запропоновано метод прокладення оптимальної траєкторії руху мобільним роботом у виробничому середовищі з динамічними перешкодами; [53] – запропоновано метод розпізнавання деталей на виробничій ділянці інтелектуального виробництва за їх візуальними ознаками; [54] – запропоновано метод передавання інформації між засобами контролю та виконавчими пристроями; [55] – запропоновано метод визначення траєкторії руху мобільного робота всередині виробничого простору серед перешкод.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на міжнародних конференціях та семінарах: Proc. SPIE, Sixteenth International Conference on Correlation Optics, 18-21 September 2023, Chernivtsi, Ukraine; 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023; 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022; IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2021; IEEE XVIIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Polyana (Zakarpattya), Ukraine, 2021; IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020; IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kyiv, Ukraine, 2019; IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), Sozopol, Bulgaria, 2019; IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Polyana, Ukraine, 2019; International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2018; 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2017; Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2016; Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2015; VI International Conference on Natural Science and Technologies, (ICONAT), 30th May-1st June 2024, Adrasan (Antalya)-Turkiye; V International Conference on Natural Science and Technologies Sunny Beach-Bulgaria, (ICONAT), 1st-3th June 2023; Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні інформаційні системи в управлінні проектами та програмами», Коблево, 12-15 вересня 2023; Міжнародна науково-практична конференція "Інтелектуальні інформаційні системи в управлінні проектами та економіці в умовах воєнного стану", Коблево, 13-16 вересня 2022; Challenges and Reality of the IT-space: Software Engineering and Cybersecurity. International Conference

(SECS), October 25-26th 2022; VIII Міжнародна конференція «Виробництво & Мехатронні Системи», Харків, 25-26 жовтня 2024; VII Міжнародна конференція «Виробництво & Мехатронні Системи», Харків, 19-20 жовтня 2023; V International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2023), Kharkiv, Ukraine, June 22-23, 2023; IV International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» (MC&FPGA-2022), Kharkiv, Ukraine, June 23-24, 2022; III International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2021), Kharkiv, Ukraine; III International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2021), Kharkiv, Ukraine, June 24-25, 2021; Fifth International Scientific and Technical Conference «Computer and information systems and technologies», Kharkiv, April 22-23, 2021.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 55 наукових праць, серед яких: 6 розділів в колективних монографіях, що видано за кордоном; 4 авторських свідоцтва; 20 статей у періодичних фахових виданнях з технічних наук, 4 з яких проіндексовано у наукометричній базі Scopus, 1 стаття категорії «А», 12 статей категорії «Б», 3 статті у періодичних виданнях країн Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР), 1 стаття у закордонному виданні; 1 вітчизняна монографія, 25 доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, 13 з яких включено до наукометричних міжнародних баз Scopus, Web of Science.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 178 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 413 сторінок, у тому числі 334 сторінки основного тексту. Робота містить 189 рисунків та 6 таблиць.

Здобувач висловлює подяку Невлюдову Ігорю Шакировичу, доктору технічних наук, професору, завідувачу кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки, заслуженому діячу науки і техніки України, Лауреату Державної премії України в галузі науки і техніки, Лауреату Державної премії України в галузі освіти за консультування та всебічну підтримку під час підготовки дисертації.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми яка вирішується в дисертаційній роботі, розглянуто сучасний стан проблеми, визначені мета, об'єкт, предмет і методи дослідження, наведені задачі, що розв'язуються у дисертаційній роботі, зв'язок з науковими НДР, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, перелік публікацій за темою роботи, надано інформацію про особистий внесок здобувача.

**В першому розділі** проведено аналіз сучасного стану та проблем впровадження кіберфізичних систем на виробництві, виконано аналіз архітектурних рішень побудови CPS.

Проведено аналіз проблеми впровадження технології цифрових двійників в інтелектуальне виробництво. Виконано аналіз методів створення цифрових двійників. Наведена класифікація типів цифрових двійників та принцип визначення типу цифрового двійника. Розглянута технологія створення цифрових двійників та їх еволюція в процесі побудови оптимальної моделі.

Проведений аналіз показав, що існують розбіжності поведінки фізичної системи та моделі цифрового двійника. Ці розбіжності є критичними при орієнтації архітектури організації інтелектуального виробництва на інтеграцію з технологіями хмарних обчислень.

Ефективне управління різноманітністю віртуальних моделей має вирішальне значення протягом усього життєвого циклу КФС, починаючи з початкового проєктування у середовищах PLM. Віртуальні моделі є основою для створення реальної системи, перетворюючись на динамічного цифрового двійника, що постійно оновлюється в реальному часі. Віртуальна частина інтегрується з реальною системою за допомогою кібернетичної системи, забезпечуючи зв'язок, обробку даних на основі штучного інтелекту, генерацію симуляцій, оптимізацію та прийняття рішень.

Технологія цифрових двійників дозволяє підвищити ефективність автоматизованої системи керування на інтелектуальному виробництві адже передбачає створення віртуальної моделі фізичного об'єкту, процесу або системи, яка може бути використана для моделювання, моніторингу, тестування та прогнозування можливого розвитку подій на основі інформації від розподіленої мережі сенсорів технологічного обладнання.

Проведено аналіз методів та засобів створення функціональних цифрових двійників. Наведені відомості про інтегровані підходи до моделювання складних цифрових двійників. Проаналізовано застосування методу «чорної скриньки» при моделюванні цифрових двійників та механізм режиму спільного моделювання складних процесів на основі функціональних компонентів цифрової моделі.

Таким чином, враховуючи проведений аналіз світового досвіду з впровадження цифрових двійників у розподілену систему керування інтелектуальним виробництвом, необхідно вирішити такі задачі: розробити модель розподіленої АСУ ТП на інтелектуальному виробництві з інтеграцією технології промислового інтернету речей та цифрового двійника виробничого процесу; розробити метод децентралізованого управління виробничими процесами із застосуванням цифрових двійників; розробити метод синхронізації цифрового двійника з фізичними процесами в АСУ ТП; провести дослідження методу інтеграції цифрового двійника в задачу управління ТП; розробити метод організації надійного зв'язку в розподіленому виробничому середовищі обміну даними між

інтелектуальними засобами автоматизації; реалізувати розроблені методи і моделі у вигляді програмних алгоритмів і методик застосування запропонованих рішень для вирішення задачі розподіленого керування виробничими процесами на основі інтеграції цифрових двійників; впровадити отримані науково-технічні результати та перевірити їх на практиці.

**В другому розділі** дисертаційної роботи розроблені основи розв'язання проблеми інтеграції цифрових двійників в розподілену автоматизовану систему керування технологічними процесами на інтелектуальному виробництві.

Запропоновано застосування методу децентралізованого управління кіберфізичною системою на основі розподілених контролерів, що дає змогу описати реальний стан виробничого середовища у випадку, коли результати роботи одного об'єкта керування впливають на параметри роботи іншого. Принцип децентралізованого процесу керування фізичними процесами на інтелектуальному виробництві з незалежними контролерами і виконавчими пристроями можна представити у вигляді функціональної схеми (рис. 1).

Дана схема описує ситуацію, коли промислові контролери розподіленого технологічного процесу керують конкретними виконавчими пристроями. Виконавчі пристрої впливають на фізичне середовище не тільки в своїй зоні відповідальності.

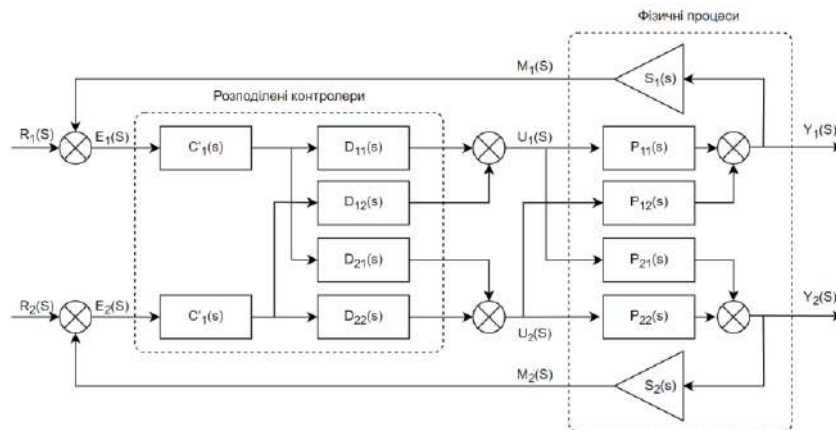


Рисунок 1 – Модель децентралізованої системи управління кіберфізичною системою

Таким чином, у фізичному світі контролер керування одним пристроєм або процесом впливає на роботу іншого обладнання або процесу в фізичному світі. Система має два входи  $R_1(s)$ ,  $R_2(s)$  та два виходи  $Y_1(s)$ ,  $Y_2(s)$ . В загальному вигляді вихід блоку керування  $U(s)$  можна описати наступним рівнянням:

$$U(s) = \begin{bmatrix} U_1(s) \\ \vdots \\ U_q(s) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Вихідний сигнал  $U(s)$  з блоку керування враховує помилку  $E(s)$ :

$$U(s) = C(s)E(s). \quad (2)$$

Фізичні процеси, керування якими відбувається за допомогою набору контролерів, можна описати наступним рівнянням:

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & \cdots & P_{1q}(s) \\ P_{21}(s) & \cdots & P_{2q}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{h1}(s) & \cdots & P_{hq}(s) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Набір розподілених контролерів записується рівнянням:

$$C(s) = \begin{bmatrix} C_{11}(s) & \cdots & C_{1q}(s) \\ C_{21}(s) & \cdots & C_{2q}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{h1}(s) & \cdots & C_{hq}(s) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Таким чином, вихідний сигнал  $Y(s)$  враховує сигнал від блоку керування  $U(s)$  і ефект від роботи блоку фізичного процесу  $P(s)$  та описується наступним рівнянням:

$$Y(s) = P(s)U(s). \quad (5)$$

Можливі варіанти вихідних сигналів на виході розподіленої системи можна подати у вигляді матриці:

$$Y(s) = \begin{bmatrix} Y_1(s) \\ \vdots \\ Y_q(s) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

В той же час набір вхідних сигналів  $R(s)$  можна подати у вигляді матриці:

$$R(s) = \begin{bmatrix} R_1(s) \\ \vdots \\ R_q(s) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Сигнали вимірювання  $M(s)$ , що надходять з виходу сенсорів  $S(s)$ , включені в ланцюг зворотного зв'язку, дають контролерам інформацію про стан виконавчих пристроїв:

$$M(s) = \begin{bmatrix} M_1(s) \\ \vdots \\ M_q(s) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Сигнал з виходу сенсорів  $M(s)$  враховує вихідний сигнал  $Y(s)$  і коефіцієнт перетворення датчика  $S(s)$ :

$$M(s) = Y(s)S(s). \quad (9)$$

Перехід до повної децентралізації відбувається з застосуванням децентралізованих контролерів  $C(s)$ :

$$C(s) = C'(s)D(s), \quad (10)$$

де  $C'(s)$  – діагональний контролер;  $D(s)$  – компенсаційний блок.

Компенсаційний блок  $D(s)$  можна представити у вигляді розподіленої мережі для мінімізації взаємодії між процесами. Таким чином, децентралізований контролер  $C(s)$  виробляє сигнали  $V(s)$ , що потрапляють на вхід розподіленої мережі. В результаті кожен діагональний контролер  $C'(s)$

управляє  $n$  незалежними процесами. Розподілена мережа  $n \times n$  при  $n = 2$  записується у вигляді компенсацийної матриці:

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Враховуючи динамічний характер реальних процесів, стандартний математичний опис моделей містить крім алгебраїчних відношень, залежності від накопиченого (інтегрального) ефекту змінних процесу і залежності від швидкості зміни (диференційного ефекту) змінних. Ці дві особливості визначають динаміку об'єкта, і вказують на той факт, що поведінка реального процесу не може бути описана задовільно без включення його минулої історії і того, як відбуваються зміни.

Один з підходів забезпечення стійкості розподіленої системи до збоїв – це використання комутованої системи з паралельними обчислювальними потоками (рис. 2). На рис. 2 показана паралельна архітектура організації взаємодії між компонентами кіберфізичної системи, де декілька процесів працюють одночасно без певних зв'язків між ними.

У цій схемі взаємодія формується динамічно, шляхом з'єднання процесів через спільну пам'ять. Усі процеси в децентралізованій системі виконуються паралельно та асинхронно, з різними швидкостями обчислення. В нотаціях кіберфізичної системи дана архітектура передбачає розпаралелювання процесів, що організовано трьома групами потоків: вимірювання, обчислення, приведення в дію.

Підхід до відмовостійкості інформаційних систем приймає як вхідні дані КФС, змодельовану функцією передачі, і створює стійку еквівалентну систему, здатну контролювати той самий фізичний процес за допомогою комутованої лінійної системи керування. Комутована система складається з кінцевої кількості підсистем і логічного правила, яке керує перемиканням між підсистемами. Його можна змодельовати наступним чином:

$$x_{k+1} = f_{\sigma(k)}(x_k, u_k), \quad (12)$$

де  $k \in \mathbb{Z}^+$  – часовий інтервал ( $\mathbb{Z}$  множина натуральних чисел);

$x \in \mathbb{R}^n$  – стан децентралізованої системи ( $\mathbb{R}$  множина дійсних чисел);  $u \in \mathbb{R}^p$  – вхідне управління;  $\sigma$  – логічне правило, за яким відбувається перемикання між підсистемами.

Функція  $f_{\sigma}$  відображає множину натуральних чисел  $\mathbb{Z}^+$  в множину цілих чисел  $I$ :

$$\sigma : \mathbb{Z}^+ \rightarrow I, \quad (13)$$

де  $I = \{1, \dots, N\}$  містить індекси підсистем.

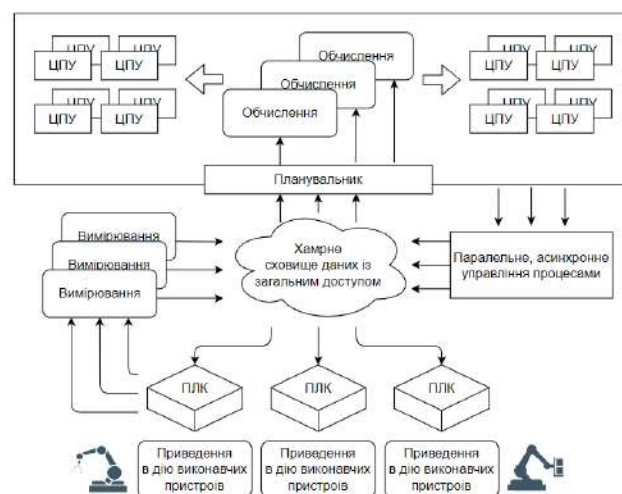


Рисунок 2 – Паралельна архітектура організації взаємодії між компонентами КФС

Підсистема визначається парою:

$$Sub = (M_i, G_i), \quad (14)$$

де  $M_i = \{A_i, B_i, C_i : i \in I\}$  – набір моделей фізичної системи;  $G_i = \{V_i, E_i : i \in I\}$  – набір графів, які представляють мережеві з'єднання в розподіленій системі комунікацій між інтелектуальним обладнанням.

Таким чином,  $\sigma$  визначає сигнал перемикавання між підсистемами, який є функцією часу (активується в момент часу  $k$ ) та визначається моделлю процесу і топологією сенсорної мережі. Фізична модель, активована в момент часу  $k$ , визначається рівнянням:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A_{\sigma(k)}x_k + B_{\sigma(k)}u_k, \\ y_k &= C_{\sigma(k)}x_k, \end{aligned} \quad (15)$$

де  $A, B, C$  – матриці моделей керування.

Даний підхід полягає в розробці розподілених контролерів, які з часом змінюють фізичну модель, яку вони виконують.

В архітектурі, що розглядається, загальний виробничий процес управляється декількома незалежними контролерами і в сукупності є децентралізованою системою керування, тобто якщо в момент часу  $k$  активується модель керування з матрицями  $A_i, B_i, C_i$ , то в підсумку ми отримуємо набір  $j$  контролерів з  $j \in 1..o$ . Кожен контролер буде використовувати набір матриць  $A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}$ :

$$A_i = \bigcup_{j=1}^o A_{ij}, B_i = \bigcup_{j=1}^o B_{ij}, C_i = \bigcup_{j=1}^o C_{ij}.$$

Таким чином, контролери працюють тільки з обмеженою частиною загальної інформації. Використовуючи набір матриць  $A, B, C$ , математичну модель КФС можна записати наступним чином:

$$x_{k+1} = Ax_k + B(u_k) + \omega_k, \quad (16)$$

де  $x_k \in R^n$  – вектор змінних стану на  $k$ -му кроці часу;  $u_k \in R^p$  – керуючий сигнал;  $\omega_k$  – шум процесу, який можна описати білим шумом Гауса;  $A \in R^{n \times n}$  – матриця стану;  $B \in R^{n \times p}$  – вхідна матриця сигналів актюаторів.

Вихідні сигнали системи залежать від набору станів  $x_k$  датчиків на які впливає шум  $v_k$ :

$$y_k = Cx_k + v_k, \quad (17)$$

де  $C \in R^{m \times n}$  – матриця вихідних сигналів.

Коли КФС використовуються для управління технологічними процесами на інтелектуальному виробництві, застосовуються великі потоки даних, що йдуть від мережі датчиків та потрапляють до виконавчих механізмів. Ці потоки накладають фундаментальні обмеження на продуктивність та можливості КФС, оскільки вони вимагають великої пропускної спроможності та сприяють швидкому виснаженню енергетичних резервів під час використання бездротового зв'язку. Для подолання цього обмеження необхідно розглядати КФС як реалізацію сукупності розподілених систем обробки інформації.

Розподілені виробничі процеси передбачають наявність паралельних технологічних процесів, що проходять паралельно. Кожне завдання розбивається на ряд паралельних процесів. Кожен процес має набір необхідного обладнання для вдалого виконання завдання. Для виконання необхідного обсягу виробничих завдань, розподілена виробнича система повинна мати технологічну гнучкість – здатність адаптуватися до різних технологічних процесів. Технологічна гнучкість виробничої системи  $VS_i$  визначає, наскільки технічно можливо переналаштувати систему за окремими робочими параметрами або їх комбінаціями:

$$VS_i = \bigcup_{j=1}^{n_{t,oi}} \left( \bigcup_{k=1}^{q_{i,j}} VS_{i,j,k} \right), \quad (18)$$

де  $n_{t,oi}$  – загальна кількість наявного технологічного обладнання для  $i$ -го технологічного процесу;  $q_{i,j}$  – набір параметрів  $j$ -го засобу виробництва;  $VS_{i,j,k}$  – певне значення параметра засобу виробництва.

Технологічно необхідна гнучкість  $VD_i$  виробничої системи визначається здатністю адаптуватися до зміни характеристик продукції, яка виготовляється:

$$VD_i = \bigcup_{j=1}^{m_i} \left( \bigcup_{k=1}^{h_{i,j}} VD_{i,j,k} \right), \quad (19)$$

де  $VD_{i,j,k}$  – набір операцій, що передбачені ТП для виготовлення  $m_i$  різної продукції;  $h_{i,j}$  – кількість технологічних операцій, потрібних для виготовлення  $j$ -ї продукції.

Технологічно необхідна гнучкість характеризується сукупністю змінних параметрів системи, які повинні відповідати параметрам і властивостям деталей, що змінюються в рамках виробничого процесу. Високе значення  $VD_i$  свідчить про здатність системи швидко та ефективно переналаштовуватися для виготовлення нових типів деталей без суттєвих змін у структурі обладнання чи технологічному ланцюгу. Така гнучкість є важливою для розподілених виробничих систем, що функціонують у середовищі з високою варіативністю продукції та частими змінами виробничих завдань.

Багатоагентну систему можна представити наступним чином:

$$MAS = \langle A, E, R, ORG, ACT, COM, EV \rangle, \quad (20)$$

де  $A$  – множина агентів, які діють у системі (програмні або апаратні елементи з автономною поведінкою);  $E$  – множина середовищ, у яких функціонують агенти;  $R$  – відносини між агентами та середовищами (зв'язки або способи взаємодії);  $ORG$  – структура організації взаємодій, яка визначає правила, ролі, ієрархії тощо;  $ACT$  – набір можливих дій агентів, як індивідуальних, так і спільних (включаючи стратегії поведінки);  $COM$  – комунікації між агентами, тобто передача інформації;  $EV$  – еволюція, здатність агентів або всієї системи змінюватися й розвиватися з часом.

Локалізація взаємодій між мікросервісами відбувається поетапно, через чітко визначену послідовність фаз: моніторинг, розподіл завдань, взаємодія і

перерозподіл обов'язків. Така поетапна структура дозволяє ефективно організовувати та керувати процесами взаємодії в мікросервісній архітектурі.

Під час фази моніторингу система оцінює інтенсивність взаємодій між сервісами, як усередині окремих вузлів, так і між ними. Для цього менеджер розподілу завдань збирає і аналізує дані про відправників і одержувачів повідомлень, а також обчислює комунікаційні залежності між сервісами в конкретні проміжки часу. Ступень комунікації в певний проміжок часу можна оцінити за формулою:

$$C_{ij}(t) = \alpha \left( \frac{M_{ij}(t)}{\sum_k M_{ik}(t)} \right) + (1 - \alpha) C_{ij}(t - 1), \quad (21)$$

де  $M_{ij}(t)$  – кількість повідомлень, що надіслані  $i$ -м сервісом та сервісом  $j$ -го вузла за період часу  $T=[t_1; t_2]$ ,  $\alpha$  – визначає, наскільки важливою вважається нова інформація порівняно зі старою при аналізі взаємодії між сервісами;  $C_{ij}(t-1)$  – значення комунікаційної залежності між сервісами  $i$  та  $j$ , яке було зафіксоване на попередньому часовому інтервалі.

Під час фази розподілу мікросервісів система, на основі даних, зібраних у фазі моніторингу, обчислює ступінь взаємозв'язку між сервісами різних вузлів. Зокрема, менеджер розраховує коефіцієнт комунікаційної залежності  $R_{ij}$ , який показує, наскільки інтенсивно взаємодіють сервіси на різних вузлах:

$$R_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{in}}, j \neq n. \quad (22)$$

Система динамічно оптимізує розміщення мікросервісів, переміщуючи їх ближче до тих вузлів, з якими вони найактивніше обмінюються даними. При перевищенні певного порогового значення комунікаційної залежності мікросервіс автоматично переміщується до групи сервісів на іншому вузлі, з яким має найбільш інтенсивну взаємодію:

$$k = \arg_i \max(R_{ij}) \wedge (R_{jk} > \theta) \rightarrow \alpha_i \in G_k, \quad (23)$$

де  $R_{ij}$  – коефіцієнт комунікаційної залежності між мікросервісом  $i$  та мікросервісом  $j$ ;  $R_{jk} > \theta$  – інтенсивність взаємодії між вузлами  $j$  і  $k$  має перевищувати певний пороговий рівень  $\theta$ ;  $\alpha_i \in G_k$  – результуючий параметр, показує, що мікросервіс  $\alpha_i$  слід включити в групу  $G_k$ , яка розміщена на вузлі  $k$ .

На фазі взаємодії передбачається узгодження між двома вузлами системи: поточним ( $R_1$ ), з якого планується перенесення завдань, і приймаючим ( $R_2$ ), на який ці завдання мають бути переміщені.

У фазі міграції агентів завершивши операції відбору агентів для міграції та отримавши позитивний відгук від приймаючого вузла, МРА відправляючого вузла спільно з менеджером міграції агентів ініціює переміщення вибраної групи агентів на приймаючий вузол. Вибір переміщуваної групи агентів здійснюється на основі комунікаційних залежностей між групами агентів і вузлами системи. Комунікаційна залежність  $D_{ij}$  між  $i$ -ю групою агентів та  $j$ -м вузлом системи визначається на основі сумування комунікаційних залежностей між усіма членами групи агентів і вузлом системи:

$$D_{ij}(t) = \sum_{k \in A_i} C_{ki}(t), \quad (24)$$

де  $A_i$  – це набір індексів усіх агентів, що належать до  $i$ -ї групи агентів;  $C_{ki}$  – комунікаційна залежність між  $k$ -м агентом та  $j$ -м вузлом у момент часу  $t$ .

Група агентів  $i^*$ , яка має найменшу залежність на поточному вузлі, обирається за таким правилом:

$$i^* = \arg_i \max \left( \sum_{ij \neq n} \frac{D_{ij}}{D_{in}} \right), \quad (25)$$

де  $n$  – номер поточного вузла агентної платформи.

Приймаюча  $j^*$ -а агентна платформа вибраної  $i$ -ї групи агентів визначається на основі комунікаційної залежності між  $i$ -ю групою агентів і  $j^*$ -м вузлом системи наступним чином:

$$j^* = \arg_i \max(D_{ij}), j \neq n, \quad (26)$$

де  $n$  – номер поточного вузла агентної платформи.

Децентралізована система управління, що базується на концепції цифрових двійників, реалізує поділ виробничого середовища на два взаємодіючі простори – фізичний і віртуальний (рис. 3). У фізичному просторі функціонують реальні технічні об'єкти, зокрема фізичні сутності, які виконують виробничі функції та забезпечують безпосередній зв'язок із технологічним процесом.

Така архітектура дозволяє кожній фізичній сутності мати відповідного цифрового двійника у віртуальному просторі, що веде до покращення керованості системи, підвищення адаптивності до змін і забезпечення більшої прозорості щодо стану та ефективності роботи обладнання. Фізичний простір складається з фізичних сутностей (ФС):

$$F = \{FC_1, FC_2, \dots, FC_n\}, \quad (27)$$

тоді як віртуальний простір є цифровим середовищем, де реалізовані цифрові двійники;

$$DT = \{CD_1, CD_2, \dots, CD_n\}. \quad (28)$$

Промислові комунікаційні шлюзи виконують ключову функцію інтеграції фізичного та віртуального просторів у децентралізованій системі керування, забезпечуючи надійний обмін даними між цифровими двійниками та їх реальними аналогами:

$$I: F \rightarrow D, I \in \{OPC - UA, Modbus, MQTT, Ethernet, \dots\}. \quad (29)$$

Центральним елементом цієї системи є Реєстр цифрових двійників, що виконує функцію не лише бази даних, але й платформи для організації взаємодії між цифровими моделями та відповідними сервісами.

Індивідуальні цифрові двійники (іЦД), позначені на рис. 3, є цифровими представленнями окремих фізичних об'єктів або компонентів виробничої системи. Вони створюються для забезпечення індивідуального моніторингу, аналізу стану, діагностики та прогнозування поведінки відповідного фізичного об'єкта:

$$iЦД_i(t) = f_i(s_i(t), u_i(t), p_i), \quad (30)$$

де  $s_i(t)$  – стан фізичної сутності  $ФС_n$  у момент часу  $t$ ;  $u_i(t)$  – керуючий сигнал;  $p_i$  – параметри моделі.

Завдяки вузькій спеціалізації іЦД дозволяють досягти високої точності в симуляції та оптимізації локальних технологічних процесів, а також створюють основу для побудови більш складних цифрових структур, таких як складені цифрові двійники (сЦД), які охоплюють декілька пов'язаних фізичних сутностей у єдину цифрову систему.

Індивідуальні цифрові двійники (іЦД), представляючи окремі фізичні об'єкти у цифровому середовищі, виступають фундаментальним елементом для побудови промислової архітектури, що керується програмними засобами. Завдяки своїй здатності точно моделювати поведінку фізичних сутностей, іЦД дозволяють створювати масштабовані та гнучкі цифрові середовища, в яких управління, моніторинг і оптимізація виробничих процесів здійснюються через програмні інтерфейси:

$$D = \{iЦД_1, iЦД_2, \dots, iЦД_n\}, \quad (31)$$

при цьому, кожен індивідуальний цифровий двійник відповідає щонайменше одній фізичній сутності:

$$\forall i, iЦД_i \leftrightarrow ФС_i, \quad (32)$$

наприклад, температурному датчику  $ФС_1$  відповідає індивідуальний цифровий двійник  $iЦД_1$ , в той час, коли двигуну  $ФС_2$  відповідає цифрова модель  $iЦД_2$ , що відображає його електричні характеристики, поточний стан.

Складені цифрові двійники створюються зі складу кількох іЦД:

$$сЦД_j \subseteq D, j = 1 \dots m. \quad (33)$$

Кожен складений цифровий двійник має функцію моделювання стану об'єкту у вигляді:

$$сЦД_j(t) = f_j(iЦД_{j1}(t), \dots, iЦД_{jk}(t), r_j), \quad (34)$$

де  $iЦД_{j1}, \dots, iЦД_{jk} \in D$  – підлегли цифрові двійники;

$r_j$  – набір правил агрегації.

Множина складених цифрових двійників записується у вигляді:

$$C = \{сЦД_1, сЦД_2, \dots, сЦД_n\}. \quad (35)$$

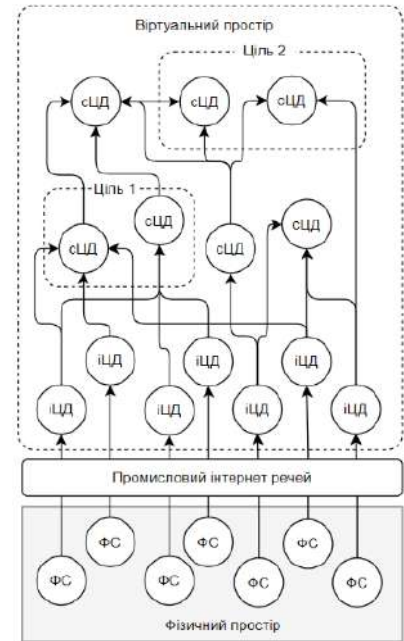


Рисунок 3 –  
децентралізована АСУ  
ТП з використанням ЦД

Складені цифрові двійники (сЦД) забезпечують узагальнене цифрове представлення комплексних систем шляхом об'єднання кількох індивідуальних цифрових двійників (іЦД), що відображає стратегію взаємодії «багато-до-багатьох». Таким чином, орієнтований граф, що описує інформаційні зв'язки між цифровими двійниками в розподіленій системі управління виробничим процесом записується у вигляді:

$$G = (D \cup C, E), \quad (36)$$

де  $E$  – множина зв'язків між цифровими двійниками (ребра орієнтовного графу).

Запропонована архітектура, зображена на рис. 4, демонструє інтеграцію розподіленої автоматизованої системи управління з технологією промислового інтернету речей (IIoT) і цифровими двійниками в рамках інтелектуального заводу.

Вона об'єднує фізичні компоненти виробництва з їхніми цифровими копіями, дозволяючи створювати замкнутий цикл управління в реальному часі. Децентралізоване управління формується з множини локальних стратегій керування:

$$U = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)\}, \quad (37)$$

де  $u_1$  – локальна стратегія керування, в момент часу  $t$ .

Кожен сигнал  $u_i(t)$  формується на основі локальної оптимізації або узгодження з іншим ЦД через правила:

$$u_i(t) = \arg \min_u J_i(s_i(t), u, \hat{s}), \quad (38)$$

де  $s_i(t)$  – стан цифрового двійника  $i$  в момент часу  $t$ ;  $u$  – варіанти можливих дій;  $\hat{s}$  – стан сусідніх цифрових двійників, що взаємодіють з ЦД $_i$ .

Архітектура інтеграції цифрових двійників в автоматизовану систему управління технологічними процесами спрямована на створення єдиного цифрово-фізичного середовища, що охоплює всі рівні виробництва. Цифровий двійник є ключовим елементом, що відображає динамічний стан виробничого процесу в реальному часі, а цифрова модель забезпечує прогнозування, аналіз і візуалізацію.

Можна виділити три основні архітектури інтеграції цифрового двійника в автоматизовану систему керування виробництвом: цифровий двійник, як цифровий прототип; цифровий двійник, як цифровий екземпляр; інтегрований комплексний цифровий двійник (рис. 5).

Першим типом є цифровий двійник як цифровий прототип (рис. 5, а). Такий підхід використовується на етапах проектування й технологічної

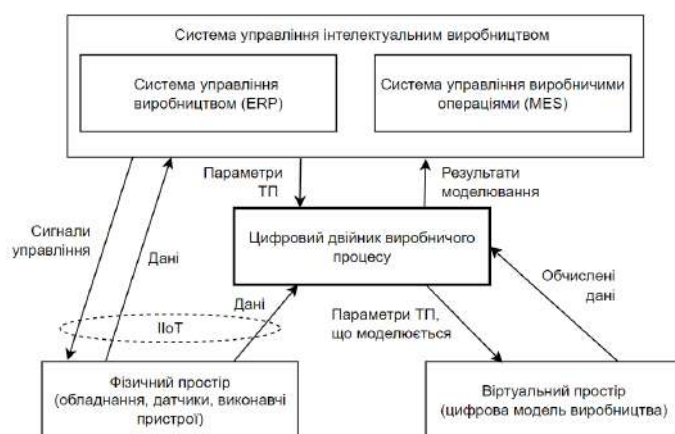


Рисунок 4 – Архітектура розподіленої АСК ТП на інтелектуальному заводі з інтеграцією IIoT та ЦД ВП

підготовки виробництва. У цьому випадку цифровий двійник створюється на основі конструкторської та технологічної документації, без прямої прив'язки до конкретного фізичного об'єкта.

Другим типом є цифровий двійник як цифровий екземпляр (рис. 5, б). У такій системі цифровий двійник функціонує як дзеркальне відображення об'єкта у реальному часі.

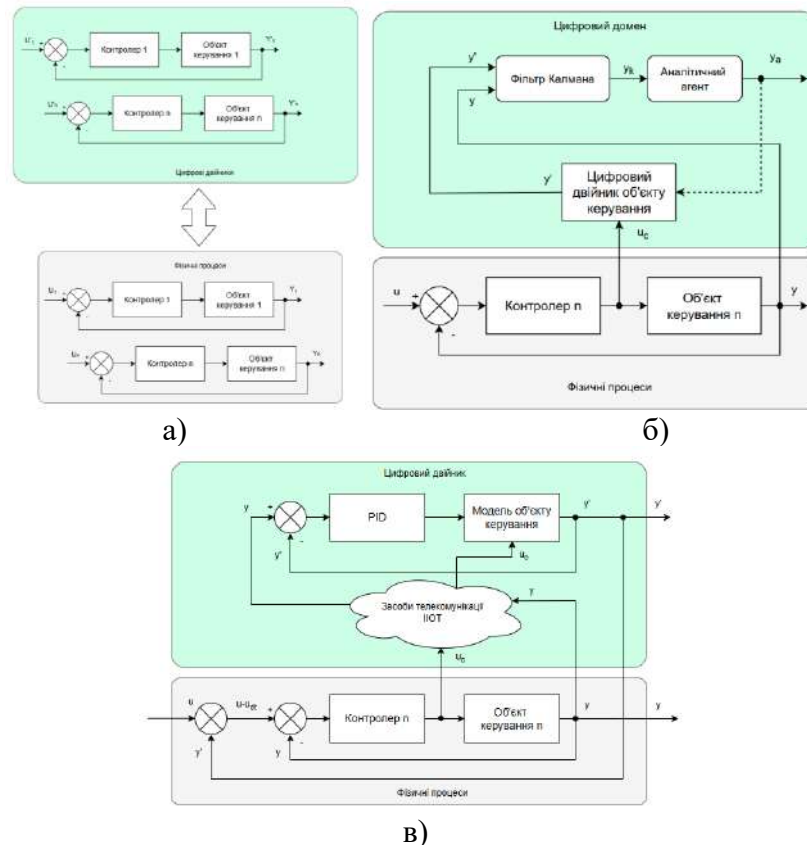


Рисунок 5 – Три архітектури інтеграції ЦД в АСК виробництвом:

а) цифровий двійник, як цифровий прототип; б) цифровий двійник, як цифровий екземпляр; в) інтегрований комплексний цифровий двійник

Синхронізація здійснюється на основі даних від сенсорів, контролерів та систем збору інформації, що дозволяє цифровій моделі реагувати на зміну вхідних параметрів, стану обладнання або зовнішніх впливів. З огляду на це в даній роботі запропоноване альтернативне поняття – «Аналітичний агент», або «Цифровий інтерпретатор». Сутність такого компоненту розглядається як активного елементу цифрової системи, що не лише оцінює поточний стан моделі цифрового двійника, але й здійснює прогнозування майбутніх змін, виявлення аномалій, формування рекомендацій щодо коригування режимів роботи. Такий модуль дає змогу реалізувати замкнений інтелектуальний контур управління, у якому цифровий двійник не лише пасивно відображає стан об'єкта, а активно бере участь в адаптації системи до зовнішніх і внутрішніх змін.

Аналітичний агент може бути реалізовано на основі методів машинного навчання (класифікаторів або нейронних мереж для виявлення аномалій). Для точної оцінки вхідних параметрів необхідно застосовувати фільтрацію шумів,

щоб відділити корисний сигнал від перешкод. Для цього найчастіше застосовується фільтр Калмана:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + G\omega_k, \quad (39)$$

$$y_k = Cx_k + Fv_k, \quad (40)$$

де  $x$  – вектор стану;  $y$  – вихідний сигнал;  $u$  – вхідний сигнал;  $\omega$  – шум процесу;  $v$  – шум вимірювання.

В даній моделі розглядається шум процесу та шум вимірювання як білий шум з коваріаціями  $Q$  та  $R$  відповідно. Фільтр Калмана для цієї системи буде описано за допомогою оновлення часу та оновлення вимірювання. Прогноз стану системи на момент часу  $k$  перед надходженням нового вимірювання можна записати у вигляді:

$$\hat{x}_{k|k-1} = A_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k, \quad (41)$$

де  $P$  – оціночна коваріаційна матриця;  $K$  – коефіцієнт підсилення Калмана;  $A_k$  – матриця переходу станів, що описує, як змінюється стан системи з кроку  $k-1$  на  $k$  (без врахування шуму);  $B_k$  – матриця впливу керування, що відображає, як вхідний сигнал впливає на зміну стану;  $u_k$  – вектор вхідного керування (керуючих дій) на момент  $k$ .

Прогноз коваріації похибки оцінки на момент  $k$  для визначення очікуваної невизначеності в апіорній оцінці можна представити у вигляді:

$$P_{k|k-1} = G_{k-1} Q_{k-1} G_{k-1}^T + A_{k-1} P_{k-1|k-1} A_{k-1}^T, \quad (42)$$

де  $P_{k|k-1}$  – прогнозована коваріаційна матриця похибки оцінки стану;  $G_{k-1}$  – матриця шуму процесу, що визначає, як процесний шум  $Q$  впливає на зміну стану;  $Q_{k-1}$  – коваріаційна матриця шуму процесу (модельна невизначеність);  $A_{k-1}$  – матриця переходу станів на попередньому кроці;  $P_{k-1|k-1}$  – оцінена коваріаційна матриця на попередньому кроці.

Коефіцієнт підсилення Калмана на кроці  $k$  визначає, як сильно система повинна "довіряти" новому вимірюванню порівняно з поточним прогнозом. Даний коефіцієнт розраховується за формулою:

$$K_k = P_{k|k-1} C_k^T (C_k P_{k|k-1} C_k^T + F_k R_k F_k^T)^{-1}, \quad (43)$$

де  $P_{k|k-1}$  – апіорна коваріаційна матриця похибки оцінки стану на момент  $k$ ;  $C_k$  – матриця вимірювання (вимірювальна модель), що описує, як внутрішній стан системи  $x_k$  пов'язаний із вимірюванням  $y_k$ ;  $C_k^T$  – транспонована матриця  $C_k$ ;  $F_k$  – матриця шуму вимірювання;  $R_k$  – коваріаційна матриця шуму вимірювання, описує дисперсію шуму в датчику або вимірювальному каналі на момент  $k$ ;  $F_k R_k F_k^T$  – загальний вплив шуму вимірювання на результат.

Таким чином, рівняння оновлення фільтра Калмана можна записати в наступному вигляді:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - C_k \hat{x}_{k|k-1}), \quad (44)$$

де  $\hat{x}_{k|k}$  – апостеріорна оцінка стану на момент часу  $k$ ;  $\hat{x}_{k|k-1}$  – апріорна оцінка стану;  $K_k$  – коефіцієнт підсилення Калмана;  $y_k$  – вимірний вихід системи на момент часу  $k$ ;  $C_k$  – матриця спостереження.

Оновлення коваріаційної матриці похибки оцінки в алгоритмі фільтра Калмана записується наступним чином:

$$P_{k|k} = (I - K_k C_k) P_{k|k-1}, \quad (45)$$

де  $I$  – одинична матриця, того ж розміру, що й  $P$ , яка використовується для збереження розмірності під час віднімання;  $P_{k|k-1}$  – апріорна коваріаційна матриця похибки оцінки стану.

Вихід системи можна оцінити на основі змінних стану та за допомогою моделі системи наступним чином:

$$\hat{y}_k = C \hat{x}_k. \quad (46)$$

Таким чином, на основі описаної моделі ми можемо оцінити поведінку фізичної системи в цифровому домені та порівняти з результатами моделювання за допомогою цифрового двійника.

Третім є інтегрований комплексний цифровий двійник. Ця архітектура показана на рисунку (рис. 5, в). та передбачає створення багатоагентної моделі, яка включає в себе не лише дані конкретного фізичного об'єкта, а й інформацію про взаємозв'язки між різними виробничими системами, логістичними ланцюгами, енергетичними потоками, персоналом і зовнішніми факторами.

Такий цифровий двійник функціонує як самонавчальна система, здатна формувати рекомендації, коригувати режими роботи, здійснювати прогнозування і підтримувати прийняття рішень на різних рівнях управління. Його синхронізація з фізичним виробництвом реалізується через розподілені сенсорні мережі, аналітичні модулі, хмарні сервіси та системи промислового інтернету речей (IIoT). Комплексний цифровий двійник здатен відображати динаміку всього виробничого середовища та забезпечувати гнучке й адаптивне управління ресурсами, виробничими процесами та якістю продукції в умовах змін зовнішніх і внутрішніх впливів.

Загальна цифрова модель об'єкту керування може бути представлена у вигляді FMU модулів. Для наближення поведінки моделі до поведінки реального об'єкта необхідно реалізувати синхронізацію цифрового двійника з фізичною системою.

Метою проектування віртуального контролера є керування системою в цифровій області таким чином, щоб вона імітувала поведінку своїх фізичних аналогів. Для цього пропонується використати PID регулятор, який отримує вихідний сигнал з реальної системи як опорний сигнал. Спочатку, шляхом порівняння цього сигналу з вихідним сигналом цифрового двійника обчислюється сигнал помилки:

$$e = y_i - y'_i.$$

Далі описується PID контролер в наступному вигляді:

$$u'_c = K_p e + K_d \frac{de}{dt} + K_i \int_0^t e(t) dt, \quad (47)$$

де  $K_p$  – пропорційний коефіцієнт (P);  $K_d$  – диференціальний коефіцієнт (D);  $K_i$  – інтегральний коефіцієнт (I);  $e$  – похибка регулювання.

У цифровому середовищі функціонує математична модель об'єкта керування, яка імітує поведінку реальної фізичної системи. Модель отримує сигнал  $u_c$ , який є результатом роботи фізичного контролера. ПІД-регулятор у цьому контексті не є частиною фізичного контролера, а є засобом синхронізації, який обчислює відхилення між фактичним значенням параметра, отриманого з фізичного об'єкта  $y$ , і значенням, що обчислене в рамках цифрової моделі  $y'$  на основі вхідного сигналу  $u_c$  з фізичного світу. Це відхилення використовується як вхід у ПІД-регулятор, який формує компенсуючий сигнал для оновлення моделі, тим самим наближаючи її динаміку до реальної системи.

Перевага запропонованої архітектури полягає в реалізації замкненого циклу синхронізації, де цифровий двійник не лише відображає стан об'єкта, а й адаптивно підлаштовується до змін, виявляє відхилення і формує коригуючі дії. Завдяки використанню PID регулятора, забезпечується синхронізація у складних умовах децентралізованого виробництва.

**В третьому розділі** дисертаційної роботи виконано рішення проблеми організації процесу обслуговування виробничого обладнання за допомогою автономних транспортних роботів. Запропоновано метод адаптивного керування технологічними процесами інтелектуального виробництва на основі розподілених кіберфізичних систем із застосуванням технології розповсюдження сигналів погодження, що надає можливість автономним агентам узгоджувати свої цілі, обмінюватись даними в реальному часі та колективно оптимізувати увесь виробничий процес.

У розподіленій АСК ТП взаємодія між пристроями реалізована через уніфікований протокол обміну повідомленнями між агентами. Цей протокол побудовано на текстових повідомленнях фіксованої структури, де кожне повідомлення складається з кількох полів, розділених символом «:». Основу протоколу становлять службові ключові слова (команди), які визначають тип дії або запиту, а також ідентифікатори *sender* (відправника), *receiver* (отримувача), *content* (змісту завдання чи стану).

На рисунку 6 наведена архітектура автоматизованої розподіленої системи управління технологічними процесами на інтелектуальному виробництві. На рисунку 6, а подано принцип організації процесу обслуговування, на рисунку 6, б – основні стадії обробки деталі.

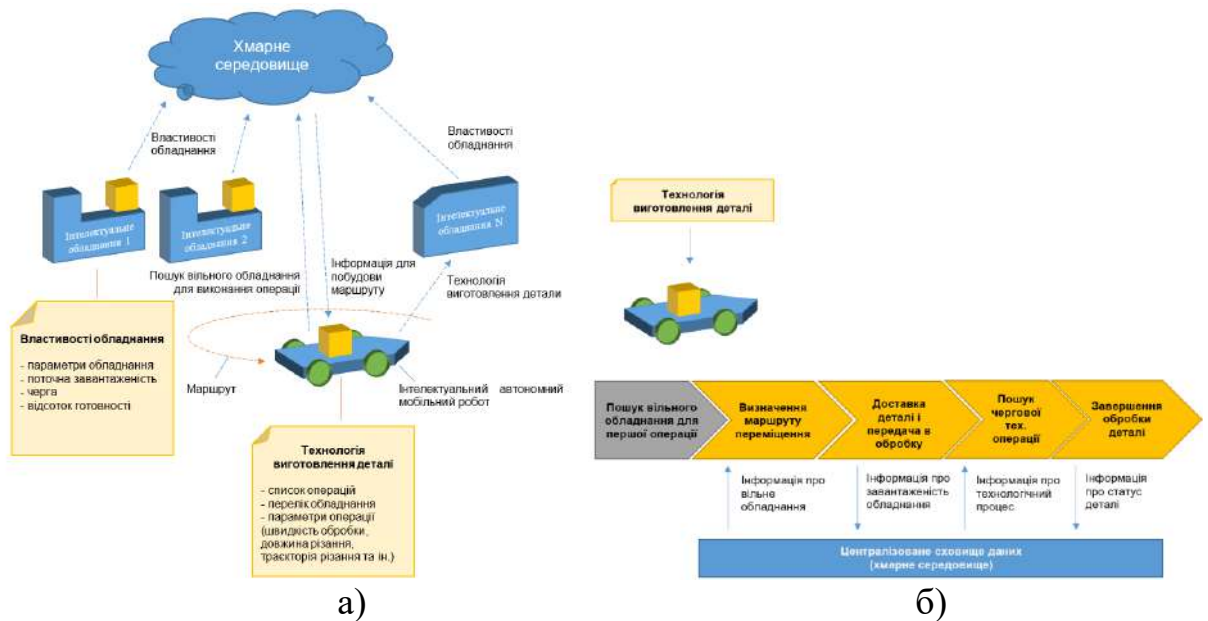


Рисунок 6 – Архітектура автоматизованої розподіленої системи управління технологічними процесами на інтелектуальному виробництві а) принцип організації процесу обслуговування; б) основні стадії обробки деталі

На рисунку 7 наведено алгоритм роботи автоматизованої системи управління групою мобільних інтелектуальних транспортних роботів. Комунікація між агентами охоплює вісім типів повідомлень, які охоплюють повний цикл взаємодії у виробничій системі – від пошуку агентів до підтвердження доставки та завершення дій. Наприклад, для виявлення присутніх поблизу агентів, транспортний агент транслює широкомовне повідомлення з форматом: «ALL:who\_place\_x?:coord\_x:AGV».

У відповідь інші агенти надсилають інформацію про себе у форматі: «receiver:status:coord:size:type:state:sender», де зазначається їхнє місцезнаходження, роль і стан (active/inactive).

Для кожної операції здійснюється підбір відповідного обладнання. Якщо все обладнання доступне, деталь приймається до подальшої обробки. Якщо обладнання немає в наявності, виконується доукомплектація ділянки новим обладнанням. На цей час деталь переводиться в режим очікування.

На рисунку 8 показана схема взаємодії між незалежними агентами автоматизованої системи. На рисунку 8, а зображено структурну схему програмного засобу для інтелектуального керування рухом роботизованого транспортного пристрою. На рисунку 8, б показано запропоновану схему організації руху інтелектуальних мобільних пристроїв. Кожному мобільному роботу виділяється певна смуга руху у виробничому приміщенні.

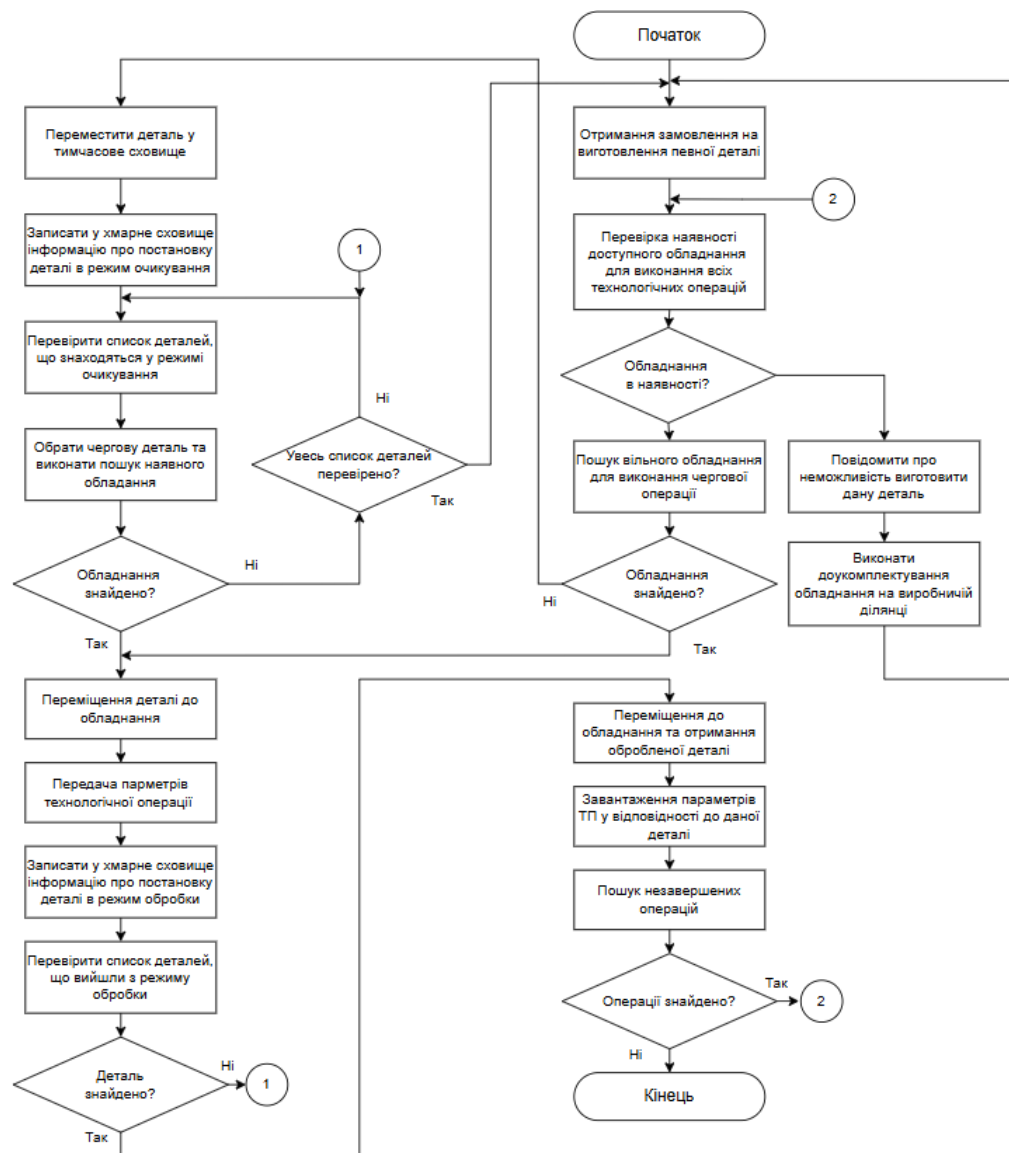


Рисунок 7 – Алгоритм роботи автоматизованої системи управління групою мобільних інтелектуальних транспортних роботів

Ця траєкторія вважається основною і на неї не можуть виходити інші роботи. Основну траєкторію перетинають траєкторії підходу до промислового обладнання. У точках перетину розміщуються так звані точки повороту та спеціальні мітки для позначення їхнього місцезнаходження. Мітки можуть бути наліпками з QR-кодом, які може зчитувати локальна навігаційна система мобільного робота.

Точки перетину головної та другорядної траєкторій є єдиними можливими місцями виникнення зіткнень у цій схемі організації руху. Щоб уникнути небажаних ситуацій, у кожному автономному роботі передбачається наявність датчиків виявлення перешкод. При виявленні перешкоди робот, що рухається по її шляху, повинен зупинитися, щоб пропустити інші транспортні засоби. Рух далі дозволяється лише після усунення перешкоди.

Робот є повністю автономним з точки зору керування своїми рухами. Виконання завдання починається з моменту отримання замовлення на

виконання транспортної операції та завершується після доставки до кінцевого пункту призначення.

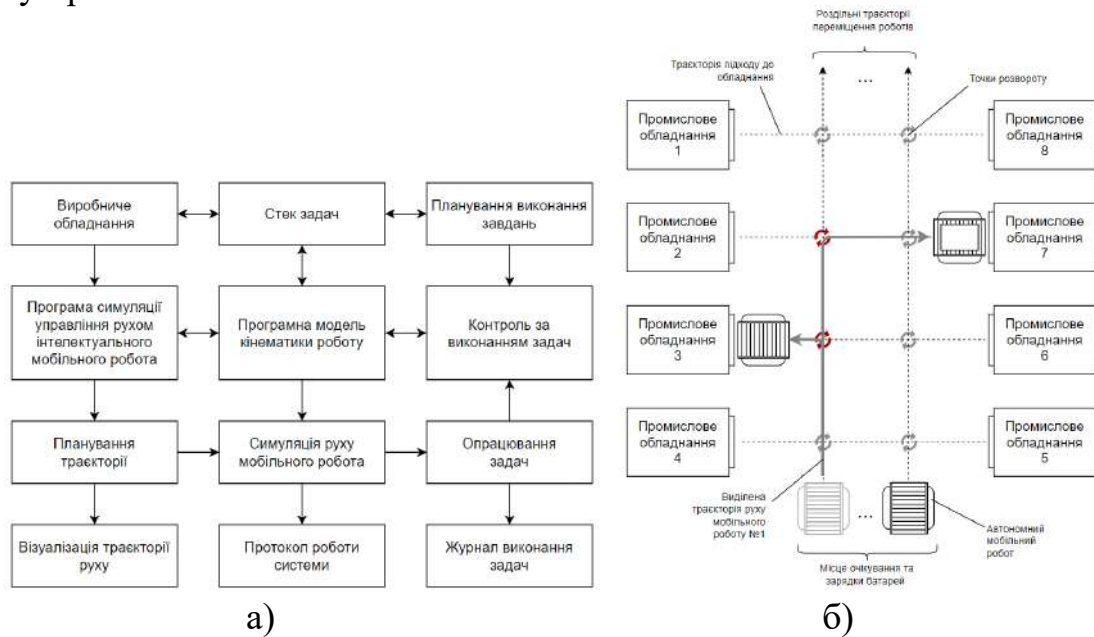


Рисунок 8 – Схема взаємодії між незалежними агентами автоматизованої системи: а) структурна схема програмного засобу для інтелектуального керування переміщенням робототехнічного пристрою; б) схема взаємодії між незалежними агентами автоматизованої системи

На рисунку 9 показано функціональну схему системи планування та керування рухом мобільного робота. Блок планування руху на основі навігаційних даних ( $y, x$ ) та даних про положення перешкод  $y_0$  формує бажану траєкторію руху  $\psi_{tr}$ . Блок керування рухом формує вектор керування  $u$  виконавчих механізмів, що впливають на мобільного робота.



Рисунок 9 – Функціональна схема системи планування та керування рухом мобільного робота

Система технічного зору отримує інформацію з навколишнього середовища та виявляє положення перешкод  $y_0$ , які також передаються до блоку планування руху. Уся система функціонує замкнено, забезпечуючи автоматичне планування, керування та корекцію руху мобільного робота в режимі реального часу.

Побудова маршруту руху мобільного пристрою за принципом єдиного хмарного центру обчислень передбачає вирішення завдання оптимального

позиціонування кожного окремого робота в групі у єдиному виробничому просторі (рис. 10).

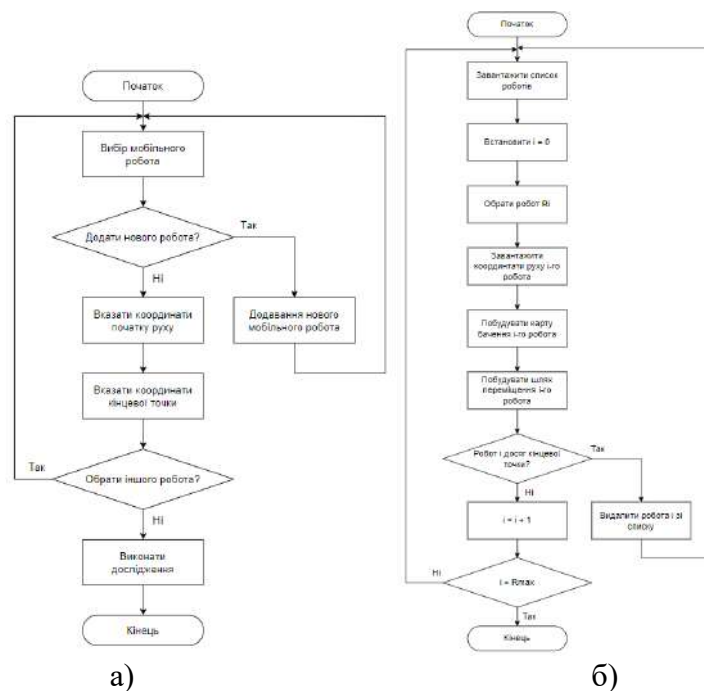


Рисунок 10 – Принцип організації взаємодії між незалежними автономними агентами: а) алгоритм роботи ЦД виробничого простору ; б) алгоритм роботи програми в режимі проведення моделювання

На рисунку 10, а показано алгоритм роботи цифрового двійника виробничого простору в режимі планування виконання дослідження. На рисунку 10, б подано алгоритм роботи програми в режимі проведення моделювання. Під час дослідження виконується моделювання ситуації переміщення групи мобільних роботів у виробничому приміщенні. При цьому, кожен робот працює незалежно від інших та прокладає траєкторію руху спираючись на дані власної сенсорної системи.

На рисунку 11 показано приклад відображення зони сканування кожним роботом, та варіант перебудови траєкторії.

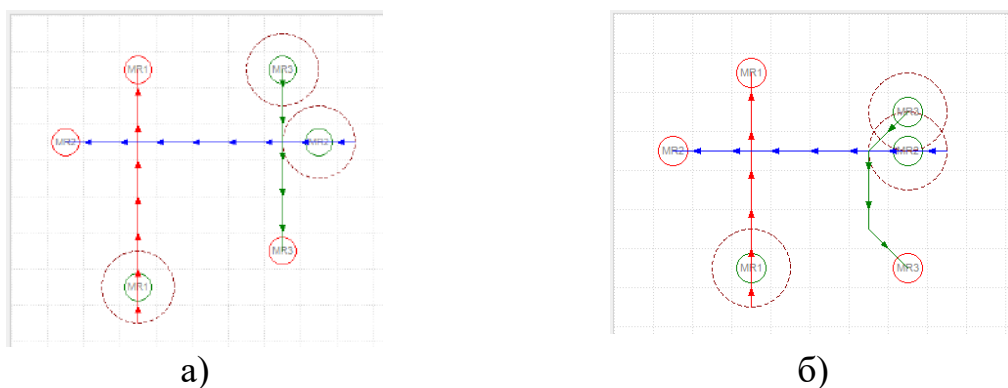


Рисунок 11 – Приклад відображення зони сканування: а) траєкторія руху MP3 до визначення перешкоди б) траєкторія руху MP3 після визначення перешкоди

**В четвертому розділі** дисертаційної роботи виконано рішення задачі орієнтації автономних транспортних роботів у виробничому середовищі та побудови децентралізованої бездротової сенсорної мережі для організації обміну інформацією між автономними мобільними роботами-агентами, та технологічним обладнанням інтелектуального виробництва. Знайшов подальшого розвитку метод локального позиціонування автономного мобільного транспортного засобу на основі BLE міток із застосуванням технології TDOA та даних про RSSI сигналів базових станцій.

Запропонований метод визначення координат мобільного робота базується на принципі тріангуляції, де три базові станції формують кола з радіусами, що відповідають відстаням до робота. Точка перетину цих кіл дозволяє обчислити положення робота в просторі  $(x, y)$ . Для підвищення точності визначення координат застосовується метод найменших квадратів (LSQ), який дозволяє знайти оптимальну оцінку місцезнаходження навіть у випадку похибок у вимірюваннях. Загальна структурна схема мережі розподілених базових станцій системи визначення координат розташування мобільного робота показана на рис. 12. Мінімальна необхідна кількість станцій дорівнює трьом. Кожна станція має автономне джерело живлення.

Для визначення координат мобільного робота за методом тріангуляції необхідно мати координати трьох базових станцій, які відповідають центрам трьох кіл. Ці координати  $((x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3))$  є заздалегідь відомими. Радіуси кіл визначаються як відстані між мобільним BLE-пристроєм і кожною з базових станцій, що оцінюються на основі значень RSSI. Для кожного з трьох кіл можна записати відповідне рівняння кола, яке встановлює залежність між положенням мобільного робота  $(x, y)$  та відомим центром і радіусом кола.

Ці рівняння використовуються для обчислення координат робота як точки перетину трьох кіл:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (48)$$

В результаті отримуємо наступні рівняння:

$$\begin{cases} (-x_1 + x_2)2x + (-y_1 + y_2)2y = r_1^2 - r_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \\ (-x_2 + x_3)2x + (-y_2 + y_3)2y = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2 \end{cases} \quad (49)$$

Система рівнянь, що визначає положення мобільного пристрою в просторі, може бути переписана у вигляді двох рівнянь з використанням констант A, B, C, D, E, F, які враховують координати базових станцій і радіуси відповідних кіл. Це дозволяє спростити обчислення координат  $(x, y)$  точки перетину:

$$\begin{cases} A_x + B_y = C \\ D_x + E_y = F \end{cases} \quad (50)$$

Вирішуючи рівняння для  $x$  та  $y$ , отримуємо:

$$x = (C \cdot B - F \cdot B) / (E \cdot A - B \cdot D), \quad (51)$$

$$y = (C \cdot D - A \cdot F) / (B \cdot D - A \cdot E). \quad (52)$$

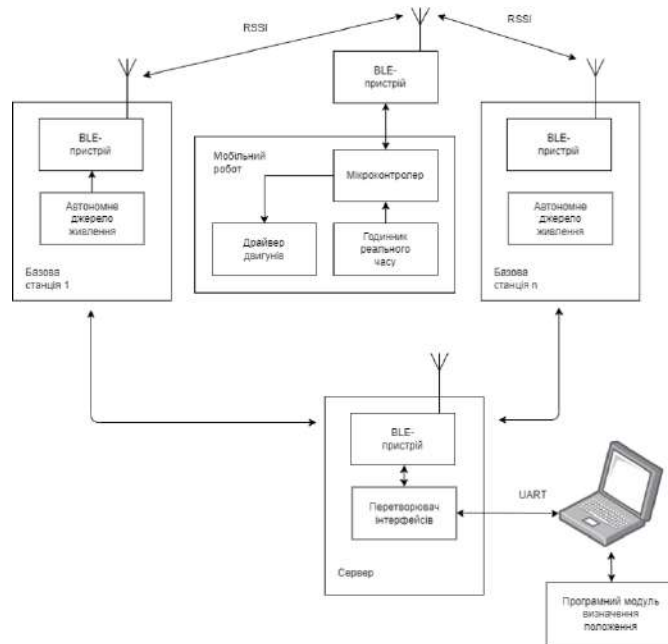


Рисунок 12 – Загальна структурна схема мережі розподілених базових станцій системи визначення координат розташування мобільного робота

Таким чином, координати  $x$  та  $y$  мобільного роботизованого пристрою визначаються у попередньо заданому координатному просторі на основі точок розташування базових станцій. Для обчислення необхідних радіусів  $r_1, r_2, r_3$ , які відповідають відстаням від мобільного робота до кожної з базових станцій, використовують значення RSSI. Залежність між RSSI та відстанню можна виразити через стандартне емпіричне рівняння:

$$R = 10^{\left(\frac{P_{TX} - RSSI}{10 \cdot n}\right)}, \quad (53)$$

де  $R$  – оцінювана відстань до базової станції;  $P_{TX}$  – потужність передавача на відстані 1 метра (в дБм);  $RSSI$  – виміряний рівень потужності сигналу (в дБм);  $n$  – коефіцієнт загасання сигналу середовищем (залежить від умов, наприклад, для приміщень зазвичай приймається в межах 2...4).

Запропонований алгоритм використано також і для зв'язку між базовими станціями локальної системи позиціонування на основі радіочастотних модулів DWM1000. Кожен мобільний об'єкт оснащений міткою, яка може обмінюватися службовими повідомленнями з базовими станціями (рис. 13).

На рисунку 13, а показано порядок обміну повідомленнями між міткою, базовими станціями та головною станцією мережі. Внутрішній таймер мітки спрацьовує кожні 20 мс. Спрацював таймер пробуджує мітку. Протягом сеансу роботи мітка по черзі опитує кілька станцій зі списку тих, що мають найбільшу потужність випромінювання радіосигналу.

На рисунку 14 показано алгоритм побудови таблиці маршрутизації в розподіленій мережі базових станцій. Таким чином, ми отримуємо багатострумковий алгоритм для знаходження шляху доставки повідомлень між базовими станціями, аналогічний до АСО (оптимізація колонії мурах). Алгоритм маршрутизатора АСО дозволяє побудувати ефективну

багатошляхову маршрутизацію та підвищити надійність мережі у разі несправностей вузлів.

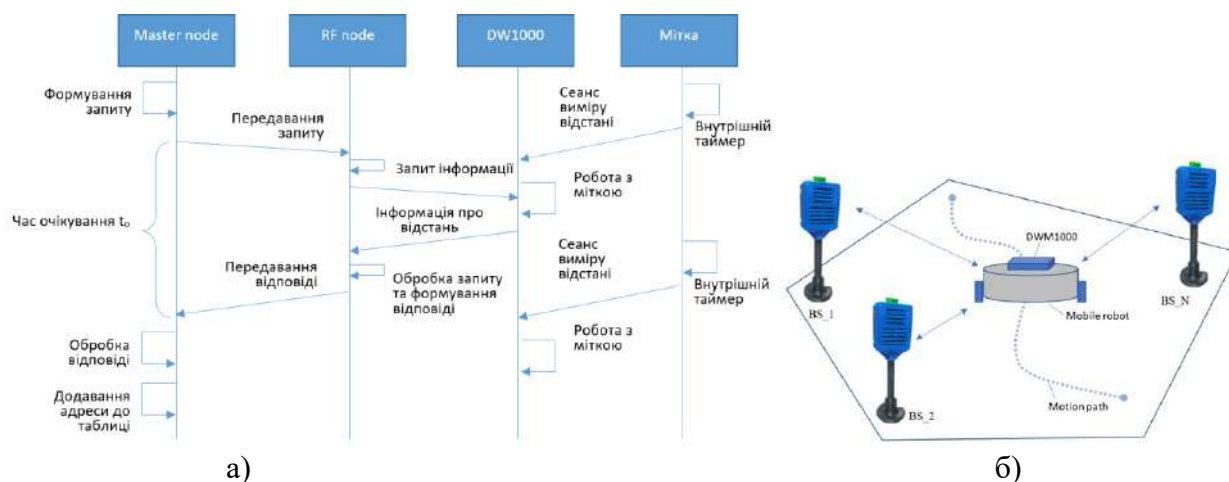
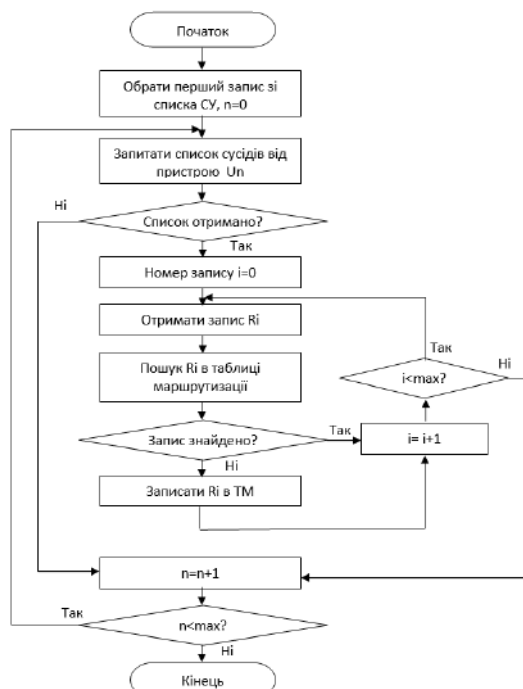


Рисунок 13 – Принцип визначення позиції мобільного робота:  
а – порядок обміну повідомленнями; б – архітектура системи

У алгоритмі маршрутизатора АСО кожна мураха намагається знайти шлях з мінімальними витратами. «Мурахі» запускаються з вузла-джерела та рухаються через сусідні вузли-ретранслятори, досягаючи кінцевого пункту призначення – приймача. Після запуску вибір наступного вузла здійснюється відповідно до наступної ймовірності (54).



$$p_k(r,s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r,s)]^\alpha \cdot [\eta(r,s)]^\beta}{\sum_{r \in R_s} [\tau(r,s)]^\alpha \cdot [\eta(r,s)]^\beta} & \text{if } k \notin \text{tabu}^r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (54)$$

де  $\tau(r,s)$  – ваговий коефіцієнт;  
 $\eta(r,s)$  – евристична інформація шляху.

Рисунок 14 – Алгоритм побудови таблиці маршрутизації

У рівнянні (54) евристична інформація – це енергетичний фактор, який визначається як:

$$\eta(r,s) = \frac{(I - e_r)^{-1}}{\sum_{n \in R_s} (I - e_n)^{-1}}, \quad (55)$$

де  $I$  – початкова енергія вузла;  $e_r$  – поточний рівень енергії вузла-приймача  $r$ .

Цей енергетичний коефіцієнт означає, що вузол з нижчим джерелом енергії має меншу ймовірність бути обраним як ретрансляційний вузол. Якщо вузли відчують будь-яку зміну своїх рівнів енергії, вони повідомляють своїх сусідів про ці зміни. Після того, як усі мурахі завершать свій маршрут, ваговий коефіцієнт буде оновлено наступним чином:

$$\tau(r,s)(t+1) = \tau(r,s)(t) + \Delta\tau(r,s)(t), \quad (56)$$

$$\Delta\tau^k(t) = \frac{1}{J_w^k(t)}, \quad (57)$$

де  $J_w^k(t)$  – довжина туру  $w_k(t)$ , який виконує мураха  $k$  на ітерації  $t$ .

Значення вагових коефіцієнтів зберігаються в пам'яті будь-якої мурахі. Кожен вузол знає про кількість вагових коефіцієнтів на шляхах до сусідніх вузлів. Збільшення кількості вагових коефіцієнтів на шляхах, що залежить від довжин турів, постійно викликає зростаючий позитивний зворотний зв'язок. Для керування процесом побудови маршруту операція оновлення вагових коефіцієнтів після туру також виконується наступним чином:

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}(t). \quad (58)$$

Після того, як завершується процес сканування, кілька вузлів стають джерелами сигналів та знають про інформацію попередню подію, яка в подальшому буде доставлена базовому вузлу ретрансляторами. Дані про сканування сусідів, що надаються вузлом-джерелом, називаються необробленими даними, які містять таку інформацію, як ідентифікатор вузла-джерела, ідентифікатор події, час та дані про подію. Необроблені дані з кожного джерела розділяються на кілька частин, які називаються частинами даних. Результат експерименту для мережі з 6-ма базовими станціями показано на рисунку 15. На рисунку 15, а показаний графік, що порівнює ефективність кожного з маршрутів передачі даних. Для обраного маршруту використовується матриця суміжності, що показана рисунку 15, б.

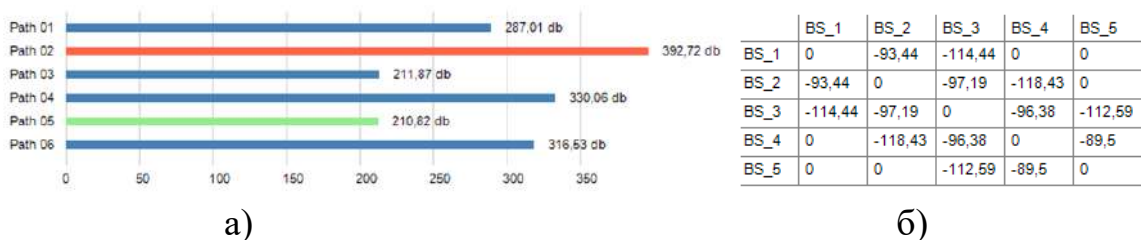


Рисунок 15 – Результат експерименту для мережі з 6-ма базовими станціями: а – графік, що показує порівняння ефективності кожного з маршрутів передачі даних; б – матриця суміжності

Результат моделювання і побудови шляху між 12-ми базовими станціями сенсорної мережі, показано на рисунку 16. Цей набір має щільність розташування базових станцій – 6 станцій на  $100 \times 100 \text{ м}^2$ .

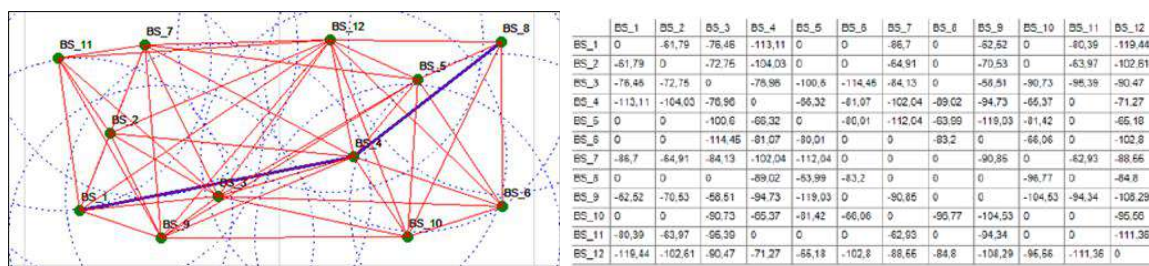


Рисунок 16 – Результат моделювання та побудови шляху між 12 базовими станціями

В п'ятому розділі дисертаційної роботи виконано рішення практичних задач з реалізації запропонованих методів. Знайшов подальшого розвитку комбінований метод поєднання інформації з двох датчиків (акселерометра та гіроскопа) для підвищення точності визначення куту повороту автономного мобільного робота відносно вертикальної вісі системи координат.

На рисунку 17 показано зовнішній вигляд розробленої інтелектуальної багатоцільової мобільної робототехнічної платформи з удосконаленими маніпуляційними можливостями в рамках держбюджетної НДР ХНУРЕ № ДР 0121U109909. На рисунку 17, а показано макет мобільної платформи. На рис. 17, б подана кінематика мобільної тележки типу skid-steer. Для реалізації запропонованого метода підвищення точності визначення кута повороту в програмі реалізовано поєднання сигналів двох датчиків акселерометра та гіроскопа. На рис. 17, в наведена функціональна схема програми визначення орієнтації мобільного робота в просторі.

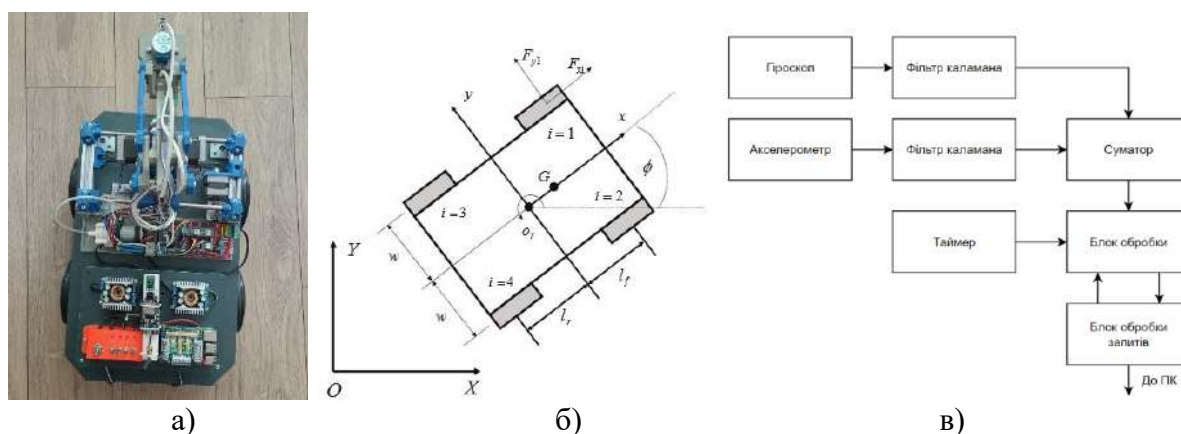


Рисунок 17 – Результати апробації запропонованих методів: а – макет мобільної платформи; б – кінематика мобільної тележки типу skid-steer; в – функціональна схема програми визначення орієнтації

На рисунку 18 показано дослідний стенд для проведення експериментальних досліджень застосування комбінованого методу

визначення положення мобільної платформи в просторі, що враховує інформацію з декількох датчиків, наприклад, акселерометра та гіроскопа, для підвищення точності визначення куту повороту відносно вертикальної вісі системи координат.

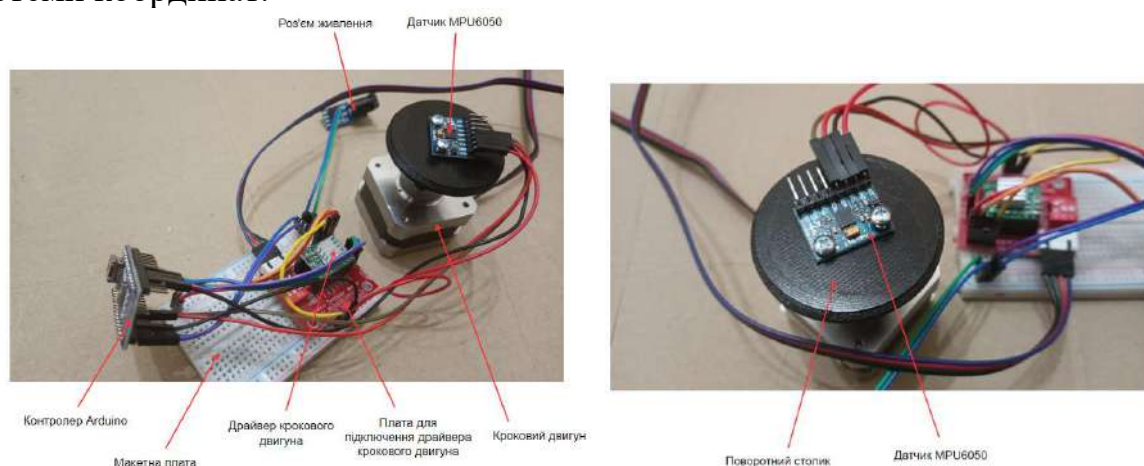


Рисунок 18 – Дослідний стенд для проведення експериментальних досліджень

В результаті використання комбінованої обробки даних з акселерометра та гіроскопа разом із фільтром Калмана було отримано експериментальні результати, наведені на рис. 19.

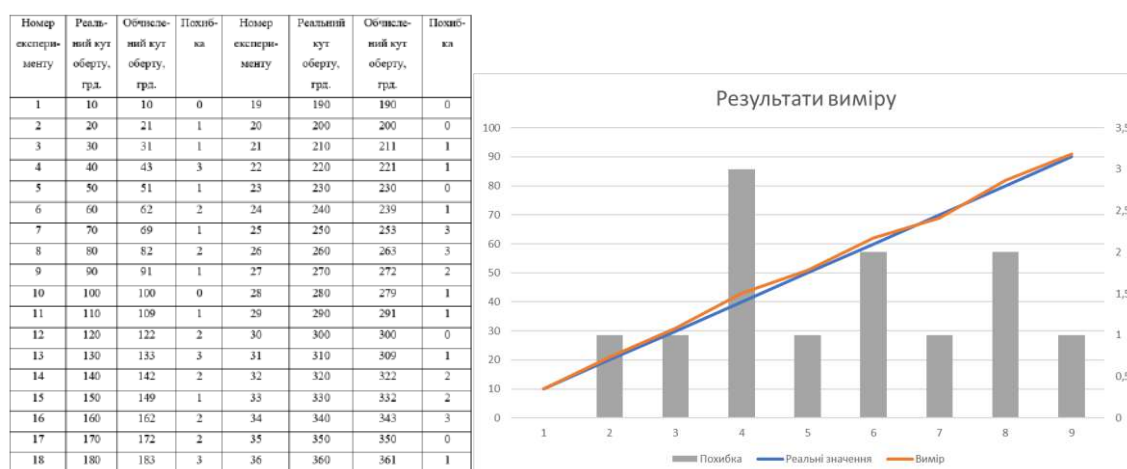


Рисунок 19 – Результати апробації комбінованого методу обробки даних з акселерометра та гіроскопа

Аналіз результатів після застосування комбінованого методу обробки даних з акселерометра та гіроскопа з використанням фільтра Калмана показав суттєве підвищення точності вимірювання кутів. У більшості випадків похибка не перевищує 3 градусів, а в окремих експериментах вона взагалі дорівнює нулю, що свідчить про високу відповідність обчисленого кута реальному.

Знайшов подальшого розвитку в метод визначення траєкторії руху безпілотного роботизованого транспортного засобу спеціального призначення

за візуальними мітками. Об'єктом керування в даному дослідженні виступає мобільна роботизована платформа з гусеничним приводом (рис. 20).

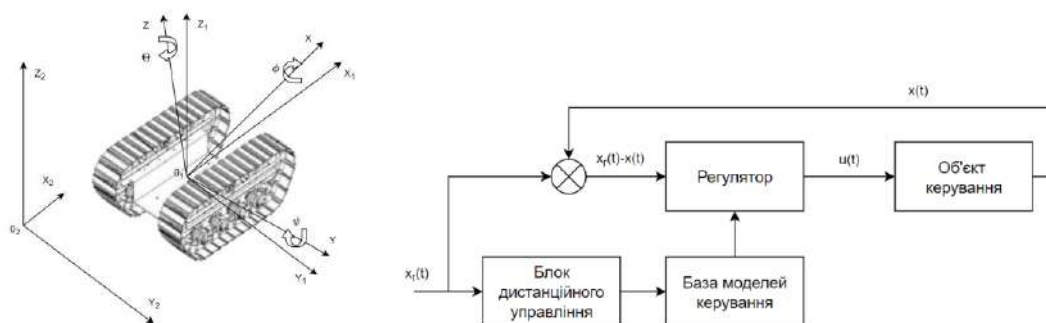


Рисунок 20 – Модель безпілотного транспортного засобу спеціального призначення

На рисунку 21 показано дослідний стенд для тестування компонентів автоматизованої системи та структура автоматизованої системи керування безпілотним роботизованим транспортним.

Дослідний стенд включає в себе наступні компоненти: головний модуль керування (1); блок управління модулем перемикавання швидкості та напрямку руху (2); блок управління модулем управління робочим інструментом (3); модуль перемикавання швидкості та напрямку руху (4); модуль управління робочим інструментом роботизованої платформи (5); пульт керування (6); блок приймально-передаючий (7); диспетчерський пульт оператора (8).

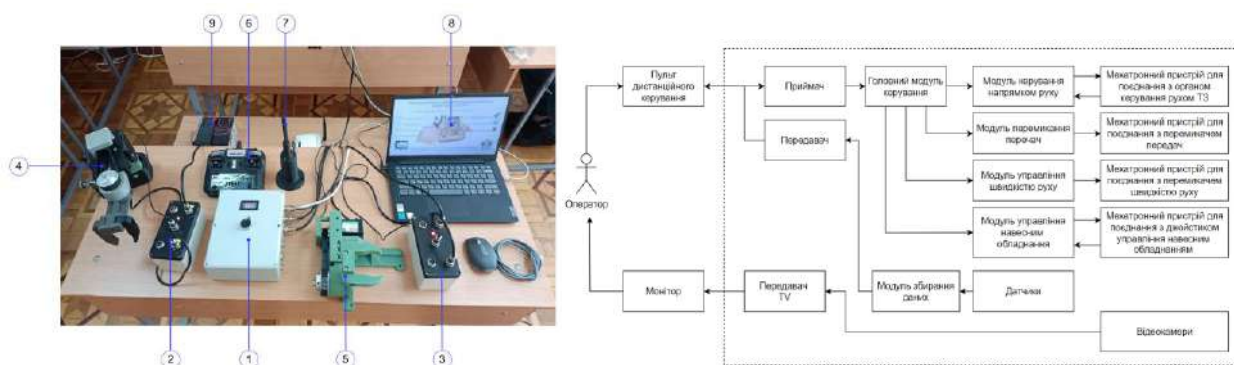


Рисунок 21 – Дослідний стенд для тестування компонентів автоматизованої системи та структура АСК безпілотним роботизованим транспортним засобом

Розроблена система керування включає пульт дистанційного керування безпілотним транспортним засобом спеціального призначення (рис. 22, а) та переносного центру керування із системою телевізійного спостереження за рухом транспортного засобу (рис. 22, б)



а)



б)

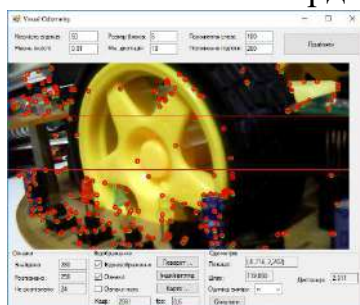
Рисунок 22 – Система дистанційного керування транспортним засобом спеціального призначення: а) розроблений пульт дистанційного керування; б) переносний центр керування

На рис. 23 показано запропоноване рішення встановлення мехатронних модулів на органи керування транспортним засобом.

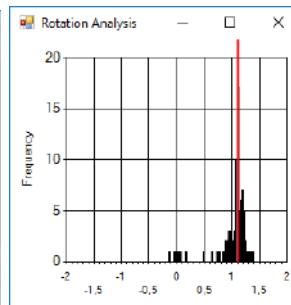


Рисунок 23 – Запропоноване рішення керування ТЗ

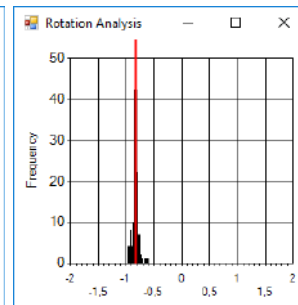
Виконана апробація застосування методу візуальної одометрії для рішення задачі локального позиціонування безпілотного роботизованого транспортного засобу спеціального призначення в поєднанні з цифровою моделлю гусеничної платформи. На рисунку 24, а показано приклад зображення з камери, що розташована на транспортному засобі в режимі візуального визначення координат.



а)



б)



в)

Рисунок 24 – Результат використання методу візуальної одометрії:  
а – приклад зображення з камери; б – зміщення вправо на  $1,2^\circ$ ; в – зміщення вліво на  $0,8^\circ$

На основі експериментальних даних та результатів дисперсійного аналізу можна зробити висновок, що застосування методу візуальної одометрії для визначення траєкторії руху мобільного роботизованого пристрою

демонструє стійку та задовільну точність у різних умовах експлуатації. Попри те, що під час експерименту фіксувалися певні відхилення від заданої траєкторії (максимальні значення сягали до 9 мм у деяких точках), середнє відхилення залишалося в межах близько  $\pm 2$  мм, а середньоквадратичне відхилення для більшості замірів не перевищувало 3–5 мм, що є допустимим у задачах навігації для мобільних платформ.

Удосконалено метод моделювання багатофакторних фізичних процесів за рахунок застосування уніфікованих функціональних модулів, що надає можливість створювати моделі цифрових двійників в різних програмних середовищах та інтегрувати їх у хмарні системи симуляції виробничих процесів. Запропонований метод довів свою ефективність при створенні автоматизованої системи підбору компонентів холодильного обладнання для ПП «Хладоюг сервис» (Договір НДР 19-07). Для розрахунку діаграми робочого циклу (енталпії) використовується метод моделювання багатофакторних фізичних процесів за рахунок застосування уніфікованих функціональних модулів, що надає можливість створювати моделі цифрових двійників холодильних компресорів та інтегрувати їх у програмну систему симуляції процесів охолодження.

На рисунку 25 наведено порівняльні характеристики компресорів, підібрані за допомогою математичного обчислення та підбору на основі рекомендацій цифрового двійника обладнання фірми Bitzer.

Таким чином, запропоноване рішення дозволяє підвищити точність визначення параметрів компонентів холодильного обладнання до 10 відсотків відносно табличного методу що дозволяє скоротити витрати на монтаж та налагодження кінцевого об'єкту на 13 відсотків.



Рисунок 25 – Порівняльні характеристики компресорів, підібрані за допомогою різного типу обчислень

При виконанні НДР на ТОВ «ЗЕО СОКОЛ» було використано метод синхронізації моделі цифрового двійника та виробничого процесу кіберфізичної системи на основі ПД-регуляторів, що надало можливість динамічного оновлення моделі у відповідності до змін параметрів фізичного процесу для підвищення якості продукції, що виробляється. На рис. 26 показано запропонований метод синхронізації цифрової моделі двійника з реальним обладнанням.

Принцип синхронізації цифрової моделі обладнання двійника з реальним технологічним обладнанням базується на динамічному коригуванні властивостей моделі в процесі виконання виробничих операцій з використанням ПД-регулятора. Основна мета цієї архітектури – забезпечити відповідність поведінки

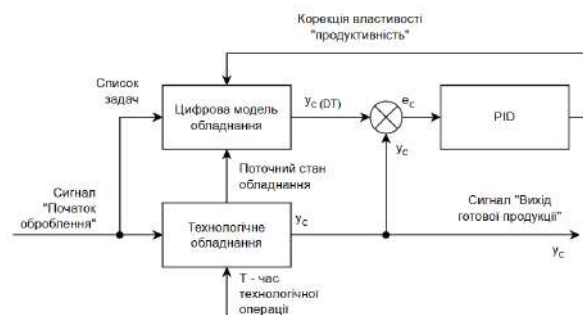


Рисунок 26 – Метод синхронізації цифрової моделі двійника з реальним обладнанням

цифрового двійника до фактичного стану фізичного обладнання, що дозволяє не лише імітувати, але й точно передбачати хід технологічного процесу.

Архітектура комплексної системи оперативно-диспетчерського керування виробничим підприємством (ОДКВП) показана на рис. 27. Представлена архітектура ілюструє інтегровану модель автоматизації управлінських, технологічних і логістичних процесів із використанням цифрових двійників, що відображають цифрові моделі виробництва, технологічного обладнання, процесів і автоматизованих складів.

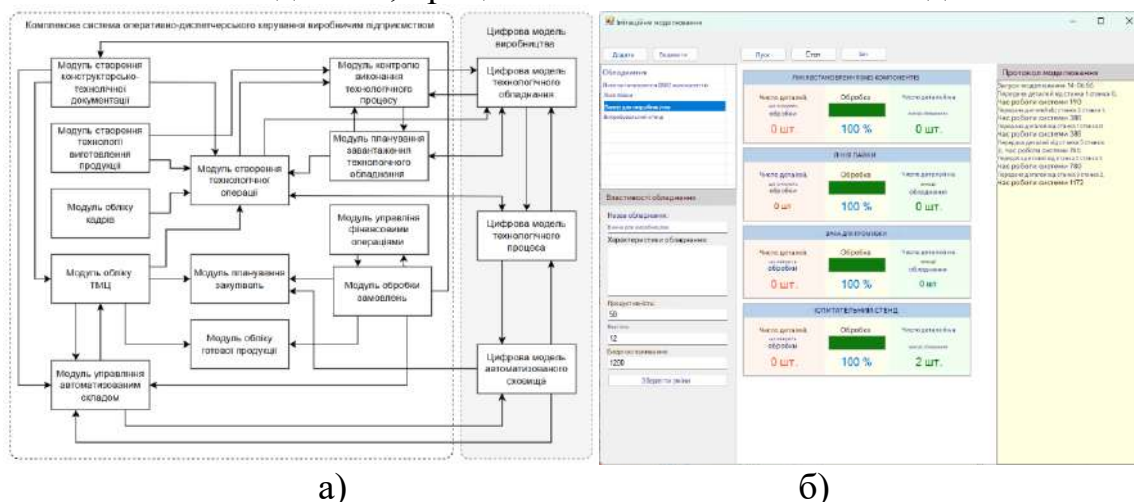


Рисунок 27 – Метод синхронізації моделі ЦД та виробничого процесу КФС: а – архітектура комплексної системи ОДКВП; б – приклад програмного модуля оцінки завантаженості технологічного обладнання на основі імітаційної моделі технологічної лінії

Цифрові моделі входять до складу автоматизованої системи у вигляді окремих програмних модулів, що можуть працювати незалежно від основного процесу, але зберігаючи та отримуючи дані з єдиного інформаційного хмарного простору.

Результати роботи з розроблення віртуальної лабораторії і цифрових двійників навчального обладнання впроваджено в навчальний процес кафедри Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки ХНУРЕ. Цифрові двійники стали основою конкурсної роботи «Досвід розроблення та впровадження віртуальних лабораторних макетів в навчальний

процес для ефективного забезпечення змішаного навчання» у 2023 році, яка отримала Гран-прі у номінації «Імплементація онлайн інструментів для ефективного впровадження змішаного навчання в закладах вищої освіти» на Міжнародній онлайн виставці «Освіта та кар'єра – День студента 2023», а ХНУРЕ був відзначений Почесним званням «Лідер наукової та науково-технічної діяльності».

Опубліковано три навчальних посібники: «Застосування цифрових двійників технічних засобів автоматизації для розроблення програмно-технічних комплексів АСУ ТП»; «Node-RED та технологія промислового Інтернету речей»; «Промислові мережі та компоненти АСУТП». Посібник «Застосування Цифрових двійників технічних засобів автоматизації для розроблення програмно-технічних комплексів АСУ ТП» став лауреатом конкурсу Національної академії наук вищої освіти України «Краще видання 2024 року».

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу теоретичну проблему зі створення нових ефективних методів децентралізованого управління виробничими процесами із застосуванням цифрових двійників, а саме, застосування автономних незалежних агентів, що самоорганізуються в комплексні структури для вирішення спільної задачі підвищення якості продукції, що виробляється.

Наукова новизна результатів отриманих особисто здобувачем полягає в наступному:

- вперше розроблена модель розподіленої АСК на інтелектуальному виробництві із застосуванням комплексних цифрових двійників, як додаткового компонента загальної системи керування виробничим процесом, що дає змогу забезпечити динамічну реконфігурацію системи керування відповідно до змін виробничих задач, конфігурації обладнання або режимів роботи;

- вперше запропоновано метод адаптивного керування технологічними процесами інтелектуального виробництва на основі розподілених кіберфізичних систем із застосуванням технології розповсюдження сигналів погодження, що надає можливість автономним агентам узгоджувати свої цілі, обмінюватись даними в реальному часі та колективно оптимізувати увесь виробничий процес;

- вперше запропоновано застосування методу децентралізованого управління кіберфізичною системою на основі розподілених контролерів що дає змогу описати реальний стан виробничого середовища у випадку, коли результати роботи одного об'єкта керування впливають на параметри роботи іншого;

- знайшов подальшого розвитку метод синхронізації моделі цифрового двійника та виробничого процесу кіберфізичної системи на основі ПД-

регуляторів, що надає можливість динамічного оновлення моделі у відповідності до змін параметрів фізичного процесу для підвищення якості продукції, що виробляється;

- дістала подальшого розвитку модель адаптації цифрового двійника під зміни властивостей фізичного об'єкту, що забезпечує підвищення точності віртуальної моделі, адже вона еволюціонує разом з реальним об'єктом в реальному часі;

- удосконалено метод моделювання багатофакторних фізичних процесів за рахунок застосування уніфікованих функціональних модулів, що надає можливість створювати моделі цифрових двійників в різних програмних середовищах та інтегрувати їх у хмарні системи симуляції виробничих процесів;

- удосконалено метод побудови маршруту розповсюдження сигналів в бездротовій розподіленій сенсорній мережі ІоТ пристроїв, що надає можливість вирішення задачі адаптації мережі під динамічні зміни архітектури виробничого процесу на інтелектуальному виробництві;

- знайшов подальшого розвитку метод локального позиціонування автономного мобільного транспортного засобу на основі BLE міток із застосуванням технології TDOA та даних про RSSI сигналів базових станцій;

- знайшов подальшого розвитку метод одночасної локалізації автономного транспортного робота та картографування для побудови карт навколишнього середовища з використанням ROS.

Практичне значення отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи полягає у вирішенні проблеми самоорганізації автономних агентів в процесі виконання спільної виробничої задачі з впровадженням нових методів побудови розподілених систем керування виробничими процесами з використанням цифрових двійників в якості додаткового компонента загальної системи управління.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для вирішення широкого класу прикладних завдань і, перш за все, задач побудови розподіленої автоматизованої системи керування виробничими процесами на інтелектуальному заводі, розгортання сенсорної мережі зв'язку між засобами автоматизації, побудови складних програмно-технічних комплексів з використанням цифрових моделей засобів автоматизації та виробничих процесів в якості функціональних макетних блоків.

Отримані результати дають змогу:

- в залежності від розміру виробничого підприємства отримати ефект від інтеграції цифрових двійників технологічного процесу та виробничих об'єктів, що коливається в межах від 5 до 8 відсотків від традиційного способу створення конструкторсько-технологічної документації;

- підвищити точність визначення параметрів компонентів технічних засобів автоматизації до 10% відносно табличного методу;

- скоротити витрати на монтаж та налагодження кінцевого об'єкту автоматизації на 3%;

- підвищити точність визначення позиції мобільного автономного робота в просторі на 6% за рахунок впровадження методу комбінації сигналів від різних типів датчиків інерційної системи навігації;
- прискорити процес аналізу інформації від сенсорів розподіленої автоматизованої системи керування виробничими процесами та прийняття рішень;
- підвищити точність цифрової моделі розподіленої виробничої системи що самоорганізується за рахунок впровадження технології цифрових двійників та застосування уніфікованих функціональних модулів.

Результати дисертаційної роботи були апробовані та впроваджені в: освітній процес Харківського національного університету радіоелектроніки (акт впровадження 14 березня 2025р.); ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ» (акт впровадження від 5 березня 2025р.); ТОВ «Харківський завод спеціальних машин» (акт впровадження від 11 лютого 2025р.); ТОВ «ЗН-Автоматика» (акт впровадження від 24 березня 2024р.); ПП «Хладоюг сервіс» (акт впровадження від 30 липня 2020р.). Також впровадження підтверджуються виконаними госпдоговірними темами: «Дослідження та проектування системи дистанційного керування для модернізації бульдозера Caterpillar D6 Dozer D6 LGP для виконання задач з гуманітарного розмінування» (Договір 24-01); «Модернізація системи дистанційного керування бульдозерам Caterpillar D6 Dozer D6 LGP для виконання задач з гуманітарного розмінування» (Договір 24-06); «Автоматизована система підбору компонентів холодильного обладнання для ПП «Хладоюг сервіс»» (Договір 19-07); «Розроблення комплексної системи оперативно-диспетчерського керування виробничим підприємством ТОВ «ЗЕО СОКОЛ»» (Договір 14-04). Результати роботи знайшли своє відображення в держбюджетній науково-дослідній роботі «Інтелектуальна багатоцільова мобільна робототехнічна платформа з удосконаленими маніпуляційними можливостями» (№ ДР 0121U109909).

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. H. Kuchuk, Y. Husieva, S. Novoselov, D. Lysytsia, and H. Krykhovetskyi, "Load Balancing of the Layers IoT FOG-Cloud Support Network," *Advanced Information Systems*, 2025, Vol. 9 (1), pp. 91-98, ISSN 2522-9052, DOI: 10.20998/2522-9052.2025.1.11 (Scopus, категорія «Б»).
2. I. Nevliudov, S. Novoselov, O. Sychova, V. Gopejenko, and N. Kosenko, "Decentralized Information Systems in Intelligent Manufacturing Management Tasks," *Advanced Information Systems*, 2024, Vol. 8 (3), pp. 100-110, ISSN 2522-9052, DOI: 10.20998/2522-9052.2024.3.12 (Scopus, категорія «Б»).
3. I. Nevliudov, S. Novoselov, and O. Sychova, "Modeling and Practical Implementation of the Optimal Wireless Security Gateway for the Industrial Automation Network," *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2022, Vol. 19 (3), pp. 303-327, eISSN 2217-7183, DOI: 10.2298/SJEE2203303N (Scopus).

4. I. Nevliudov, S. Novoselov, and A. Resnichenko, "Experimental Verification of Theoretical Foundations Making the Basis of the Substrate Roughness Surface Automated Control Technology," *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, 2012, Vol. 71 (19), pp. 1791-1799, ISSN 1943-6009, DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i19.80 (Scopus).
5. S. Novoselov, O. Sychova, "Automation of the Group Formation Process for Education Applicants to Study Elective Educational Components," *Decision support systems in project and program management, Collective monograph*, Riga, ISMA, 2024, pp. 175-187, ISBN 978-9984-891-33-0, DOI: 10.30837/MMP.2024.175 (Розділ в колективній монографії).
6. I. Nevliudov, S. Novoselov, O. Klymenko, and M. Vzhesnievskiy, "Software Implementation of the Conveyor Digital Twin of the Technological Line," *Information systems in project and program management, Collective monograph*, Riga, ISMA, 2023, pp. 240-250, ISBN 978-9984-891-22-4, DOI: 10.30837/MMP.2023.240 (Розділ в колективній монографії).
7. S. Novoselov, O. Sychova, "Technology of Using Digital Twins in the Control of Industrial Equipment," *Information systems in project and program management, Collective monograph*, Riga, ISMA, 2023, pp. 281-289, ISBN 978-9984-891-22-4, DOI: 10.30837/MMP.2023.281 (Розділ в колективній монографії).
8. S. Novoselov, I. Nevliudov, "Technology of Distributed Management of Production Processes with the Use of a Service-Oriented Approach," *Innovative integrated computer systems in strategic project management, Collective monograph*, Riga, 2022, pp. 124-138, ISBN: 978-9984-891-24-8, DOI: 10.30837/MMP.2022.124 (Розділ в колективній монографії).
9. S. Novoselov, O. Sychova, and S. Tesliuk, "Multiflowed Software Motion Control Technology for a Two-Link Manipulator with four Degrees of Freedom," *Innovative integrated computer systems in strategic project management, Collective monograph*, Riga, ISMA, 2022, pp. 151-163, ISBN: 978-9984-891-24-8, DOI: 10.30837/MMP.2022.151 (Розділ в колективній монографії).
10. I. Nevliudov, I. Zharikova, S. Novoselov, V. Nevliudova, "Determination of destruction conditions for substrates of flexible printed structures," *Theoretical and scientific foundations in research in Engineering, Collective monograph*, Boston, Primedia eLaunch, 2022, pp. 280-287, DOI: 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1 (Розділ в колективній монографії).
11. *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №92635* Програмний засіб управління рухом роботизованої платформи на основі міток з QR-кодом для автоматизації складських приміщень, автори: Новоселов С.П., Теслюк С.І., Сичова О.В., Дата реєстрації 08.10.2019 р.
12. *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №90957* Комп'ютерна програма «Програмний засіб для автоматизації відділу обліку товарів», автори: Новоселов С.П., Роменський В.І., Теслюк С.І., Дата реєстрації 23.07.2019 р.

13. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №80304 Комп'ютерна програма «Автоматизація обліку технологічних операцій», автори: Невлюдов І.Ш., Новоселов С.П., Сичова О.В., Донсков О.М. Дата реєстрації 16.07.2018 р.

14. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №80305 Комп'ютерна програма «Автоматизація обліку співробітників на виробництві», автори: Невлюдов І.Ш., Новоселов С.П., Сичова О.В., Донсков О.М. Дата реєстрації 16.07.2018 р.

15. S. Novoselov, I. Lobanova, "Modeling Principles of Multi-Agent Control Automated Assembly site of CEA," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, Vol. 3/3(51), pp. 26-29, DOI: 10.15587/1729-4061.2011.1508 (Категорія «А», з 2015 р. індексується наукометричною базою Scopus).

16. I. Nevlyudov, S. Novoselov, and O. Sychova, "Method of Decentralized Control of Technological Processes in Intelligent Manufacturing," *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2025, Vol. 1 (31), pp. 166-179, DOI: 10.30837/2522-9818.2025.1.166 (Категорія «Б»).

17. I. Nevlyudov, S. Novoselov, and K. Sukhachov, "Method of Simultaneous Localization and Mapping for Construction of 2.5D Maps of the Environment Using ROS," *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 2023, Vol. 2 (24), pp. 145-160, DOI: 10.30837/ITSSI.2023.24.145 (Категорія «Б»).

18. I. Nevliudov, S. Novoselov, O. Sychova, and S. Tesliuk, "Determining the Coordinates of a Mobile Robot in an Industrial Space Using BLE Technology Based on RSSI Data Received from Base Stations," *Radiotekhnika*, 2022, Vol. 2 (209), pp. 185-191, DOI: 10.30837/rt.2022.2.209.18 (Категорія «Б»).

19. I. Nevlyudov, S. Novoselov, and O. Sychova, "Development and Study of the Operation of the Module for Determining the Orientation of the Manipulator Joint," *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 2022, Vol. 2 (20), pp. 86-96, DOI: 10.30837/ITSSI.2022.20.086 (Категорія «Б»).

20. I. Nevliudov, V. Yevsieiev, N. Demska, and S. Novoselov, "Development of a Software Module for Operational Dispatch Control of Production Based on Cyber-Physical Control Systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2020, Vol. 4 (14), pp. 155-168, ISSN 2524-2296, DOI: 10.30837/ITSSI.2020.14.155 (Категорія «Б»).

21. Невлюдов І.Ш., Демська Н.П., Разумов-Фризюк Є.А., Новоселов С.П. Контроль якості електричних міжз'єднань гнучких структур. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, 2020, 1 (63), с. 103-112. DOI: 10.30748/zhups.2020.63.14. (Категорія «Б»).

22. S. Novoselov, O. Sychova, S. Tesliuk, and I. Hrinchenko, "Analysis of Industrial Automation Objects Interaction Using Internet of Things Technology," *Control, Navigation and Communication Systems*, Poltava, 2017, Vol. 2 (42), pp. 43-45, ISSN: 2073-7394 (Категорія «Б»).

23. Новоселов С. П., Дудченко С. С. Дослідження методів динамічного спостереження за об'єктом на території, що охороняється за допомогою розподіленої системи відеоспостереження. *Вісник Національного технічного університету XIII. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, 2013, 26 (999), с. 44-48, ISSN 2079.5459 (Категорія «Б»).
24. S. Novoselov, E. Rak, "The Method of Constructing the Routing Tables for Wireless Sensor Networks," *Technology Audit and Production Reserves*, 2013, Vol. 2 (1(10)), pp. 42-44, DOI: 10.15587/2312-8372.2013.12958 (Категорія «Б»).
25. S. Novoselov, I. Lobanova, "The Investigation of Methods of REA Assembly areas Multiagent Control," *Radiotekhnika*, 2011, Vol. 164, pp. 139-143, (Категорія «Б»).
26. I. Nevliudov, S. Novoselov, and O. Sychova, "Control Automation of Assembly Operations Using a Computer Vision System in Intelligent Production," *Journal of natural sciences and technologies*, 2023, Vol. 2 (2), pp. 173-182, DOI: 10.5281/zenodo.8098567 (Стамбул, Туреччина, країна ОЕСР).
27. I. Nevliudov, S. Omarov, S. Tesliuk, S. Novoselov, and O. Sychova, "Robot Group Interaction Technology Using a Cloud Server," *Journal of Natural Sciences and Technologies*, 2023, Vol. 1 (1), pp. 85-92 (Стамбул, Туреччина, країна ОЕСР).
28. I. Nevliudov, S. Novoselov, O. Klymenko, and M. Vzhesnievskyi, "Design and Study of Gateway Operating Modes for Industrial Intern of Things," *International independent scientific journal*, 2021, Vol. 33, pp. 75-78 (Краків, Польща, країна ОЕСР).
29. I. Nevliudov, M. Omarov, S. Novoselov, "Modeling and Selection of Optimal Parameters of Security Gateways to Protect Industrial Equipment from Cyberattacks," *Journal of Modern Technology and Engineering*, 2021, Vol. 6 (3), pp. 219-229 (Баку, Азербайджан).
30. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: *Монографія*. – Х. : 2022. – 427 с. (Монографія).
31. O. Filipenko, O. Sychova, and S. Novoselov, "Modeling, decision support, and software for automated positioning of photonic crystal fiber," *2024 Proc. SPIE, Sixteenth International Conference on Correlation Optics*, Vol. 12938 (1293806), 2024, DOI: 10.1117/12.3008982 (Scopus).
32. I. Nevliudov, S. Novoselov, O. Sychova, D. Mospan and O. Klymenko, "Modeling of a Decentralized System for Maintenance of Production Equipment Based on Transport Robots," *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-6, DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402485 (Scopus).
33. I. Nevliudov, S. Novoselov, O. Sychova and D. Mospan, "Multithreaded Software Control of Industrial Manipulator Movement," *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-6, DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005675 (Scopus).

34. I. Nevludov, O. Sychova, O. Reznichenko, S. Novoselov, D. Mospan and V. Mospan, "Control System for Agricultural Robot Based on ROS," *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2021, pp. 1-6, DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598560 (Scopus).
35. I. Nevliudov, S. Novoselov, O. Sychova and S. Tesliuk, "Development of the Architecture of the Base Platform Agricultural Robot for Determining the Trajectory Using the Method of Visual Odometry," *2021 IEEE XVIIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Polyana (Zakarpattya), Ukraine, 2021, pp. 64-68, DOI: 10.1109/MEMSTECH53091.2021.9468008 (Web of Science, Scopus).
36. I. Nevludov, O. Sychova, A. Andrushevich, S. Novoselov, D. Mospan and V. Mospan, "Simulation of the Sensor Network of Base Stations in a Local Positioning System in Intelligent Industries," *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240842 (Scopus).
37. S. Novoselov and O. Sychova, "Using Wireless Technology for Managing Distributed Industrial Automation Objects within the Concept of Industry 4.0," *2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 580-584, DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061333 (Scopus).
38. I. Nevliudov, S. Novoselov and O. Sychova, "Development of the Anisotropic Filtration Method for Automated Recognition of Authenticity of Banknotes by their Images," *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*, Sozopol, Bulgaria, 2019, pp. 484-488, DOI: 10.1109/CAOL46282.2019.9019435 (Web of Science, Scopus).
39. S. Novoselov, O. Sychova and S. Tesliuk, "Development of the Method Local Navigation of Mobile Robot a Based on the Tags with QR Code and Wireless Sensor Network," *2019 IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Polyana, Ukraine, 2019, pp. 46-51, DOI: 10.1109/MEMSTECH.2019.8817405 (Web of Science, Scopus).
40. S. Novoselov, "Wireless Sensor Network for Communication Between Base Stations in the Local Positioning System," *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 383-386, DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632140 (Web of Science, Scopus).
41. S. Novoselov and O. Donskov, "Distributed Local Positioning System Using DWM1000 Location Chip," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2017, pp. 489-492, DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246445 (Web of Science, Scopus).
42. S. Novoselov and O. Donskov, "Study of Mobile Device Wireless Control Technology in the Visible Range of the Electromagnetic Radiation," *2016*

*Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2016, pp. 123-124, DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905355. (Web of Science, Scopus).

43. I. Zharikova, S. Novoselov, V. Nevlyudova and O. Botsman, "Electromagnetic Compatibility Analysis of the Infocommunication Systems Components on the Flexible Structures Basis," *2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2015, pp. 101-103, DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2015.7357282 (Web of Science, Scopus).

44. С. Новоселов, І. Гладков І. Сучасний промисловий інтернет речей та хмарні технології. *Виробництво & Мехатронні Системи: матеріали VII-ої Міжнародної конференції*, Харків, 19-20 жовтня 2023 р., с 40-42.

45. I. Nevliudov, S. Novoselov, and O. Sychova, "A Method of Sorting Parts in an Intelligent Factory Based on a Manipulator with a Pneumatic Gripper in Combination with a Computer Vision System," *VI International Conference on Natural Science and Technologies, (ICONAT)*, 30th May-1st June 2024, Adrasan (Antalya)-Turkiye.

46. I. Nevliudov, S. Novoselov, and O. Sychova, "Control Automation of Assembly Operations Using a Computer Vision System in Intelligent Production," *V International Conference on Natural Science and Technologies Sunny Beach-Bulgaria, (ICONAT)*, 1st-3th June 2023, p. 15. ISBN: 978-625-00-1543-8.

47. Новоселов С. П., Сичова О. В. Принцип використання віртуальних приладів в управлінні промисловим обладнанням. *Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні інформаційні системи в управлінні проєктами та програмами»*, Коблево, 12-15 вересня 2023 р., с.155-158.

48. Новоселов С. П., Сичова О. В., Теслюк С. І. Багатопотокове програмне керування рухом промислового маніпулятора. *Міжнародна науково-практична конференція "Інтелектуальні інформаційні системи в управлінні проєктами та економіці в умовах воєнного стану"*, Коблево, 13-16 вересня 2022 р., с. 92-95.

49. I. Nevliudov, S. Novoselov, and O. Sychova, "Motion Control of the Angular Type Educational Manipulator Using Visual Components," *Challenges and Reality of the IT-space: Software Engineering and Cybersecurity. International Conference (SECS)*, October 25-26th 2022, pp. 72-86.

50. С. Новоселов, В. Іванов. Вирішення задачі управління багатоланковим маніпулятором. *Виробництво & Мехатронні Системи: матеріали VIII-ої Міжнародної конференції*, Харків, 25-26 жовтня 2024 р, с. 132-134.

51. S. Novoselov, O. Sychova, "Digital Twin of the Educational Equipment "Sorting Station"," *V International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2023)*, Kharkiv, Ukraine, June 22-23, 2023, pp. 11-14. DOI: 10.35598/mcfpga.2023.002.

52. S. Novoselov, O. Sychova, and S. Tesliuk, "Algorithm for Finding the Optimal Way to Move a Mobile Platform Among Indefinite Obstacles," *IV International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» (MC&FPGA-2022)*, Kharkiv, Ukraine, June 23-24, 2022, pp. 21-23. DOI: 10.35598/mcfpga.2022.007.

53. S. Novoselov, O. Sychova, and Y. Pashchenko, "Automated Module for Product Identification by their Visual Characteristics," *III International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2021)*, Kharkiv, Ukraine, June 24-25, 2021, pp. 25-28.

54. S Novoselov, S. Tesliuk, "Study of the Method of Information Transfer to LED Matrix According to the ModBus Protocol," *III International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2021)*, Kharkiv, Ukraine, June 24-25, 2021, pp. 32-36.

55. I. Nevludov, S. Novoselov, O. Sychova, and S. Tesliuk, "Production Workspace Obstacle Avoidancemobile Robot Trajectory Modeling," *Fifth International Scientific and Technical Conference «Computer and information systems and technologies»*, Kharkiv, April 22-23, 2021, pp. 61-62, DOI: 10.30837/csitic52021232778.

## АНОТАЦІЯ

Новоселов С.П. Розподілені самоорганізовані процеси керування інтелектуальним виробництвом на основі інтеграції технології цифрових двійників. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків, 2025.

У дисертаційній роботі вирішено важливу теоретичну проблему зі створення нових ефективних методів децентралізованого управління виробничими процесами із застосуванням цифрових двійників, а саме, застосування автономних незалежних агентів, що самоорганізуються в комплексні структури для вирішення спільної задачі підвищення якості продукції, що виробляється. Проведено аналіз проблеми впровадження технології цифрових двійників в інтелектуальне виробництво. Показано, що існують розбіжності поведінки фізичної системи та моделі цифрового двійника. Ці розбіжності є критичними при орієнтації архітектури організації інтелектуального виробництва на інтеграцію з технологіями хмарних обчислень. Розроблені основи розв'язання проблеми інтеграції цифрових двійників в розподілену автоматизовану систему керування технологічними процесами на інтелектуальному виробництві. Розроблена модель розподіленої АСК на інтелектуальному виробництві із застосуванням комплексних

цифрових двійників, як додаткового компонента загальної системи керування виробничим процесом, що дає змогу забезпечити динамічну реконфігурацію системи керування відповідно до змін виробничих задач, конфігурації обладнання або режимів роботи. Запропоновано метод адаптивного керування технологічними процесами інтелектуального виробництва на основі розподілених кіберфізичних систем із застосуванням технології розповсюдження сигналів погодження, що надає можливість автономним агентам узгоджувати свої цілі, обмінюватись даними в реальному часі та колективно оптимізувати увесь виробничий процес.

Отримані результати дають змогу в залежності від розміру виробничого підприємства отримати ефект від інтеграції цифрових двійників технологічного процесу та виробничих об'єктів, що коливається в межах від 5 до 8 відсотків від традиційного способу створення конструкторсько-технологічної документації; підвищити точність визначення параметрів компонентів технічних засобів автоматизації до 10% відносно табличного методу; скоротити витрати на монтаж та налагодження кінцевого об'єкту автоматизації на 3%; підвищити точність визначення позиції мобільного автономного робота в просторі на 6% за рахунок впровадження методу комбінації сигналів від різних типів датчиків інерційної системи навігації; прискорити процес аналізу інформації від сенсорів розподіленої автоматизованої системи керування виробничими процесами та прийняття рішень; підвищити точність цифрової моделі розподіленої виробничої системи що самоорганізується за рахунок впровадження технології цифрових двійників та застосування уніфікованих функціональних модулів.

Достовірність наукових положень та зроблених висновків підтверджується узгодженістю теоретичних досліджень та моделювання з отриманими результатами експериментів на реальних даних, а також впровадженням результатів дисертаційного дослідження на реальних об'єктах.

Ключові слова: автоматизована система керування, розподілені виробничі процеси, цифровий двійник, самоорганізація, синтез, ідентифікація, вузлові спільноти, інтеграція, локалізація, мікросервісна архітектура, оптимізація, робот маніпулятор, автономний мобільний робот, планування траєкторії, нейронна мережа.

## ABSTRACT

Novoselov S.P. Distributed self-organized processes of intelligent production management based on the integration of digital twin technology. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.13.07 – automation of control processes. –Kharkiv National University of Radio Electronics of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation solves an important theoretical problem of creating new effective methods of decentralized management of production processes using digital twins, namely, the use of autonomous independent agents that self-organize into complex structures to solve the common task of improving the quality of manufactured products. The problem of implementing digital twin technology in intelligent production is analyzed. It is shown that there are differences in the behavior of the physical system and the digital twin model. These differences are critical when orienting the architecture of the organization of intelligent production to integration with cloud computing technologies. The foundations of solving the problem of integrating digital twins into a distributed automated process control system in intelligent production have been developed. A model of distributed ASC in intelligent production has been developed using complex digital twins as an additional component of the general production process control system, which allows for dynamic reconfiguration of the control system in accordance with changes in production tasks, equipment configuration or operating modes. A method of adaptive control of technological processes in intelligent production based on distributed cyber-physical systems using the technology of distributing agreement signals has been proposed, which allows autonomous agents to coordinate their goals, exchange data in real time and collectively optimize the entire production process.

The results obtained allow, depending on the size of the manufacturing enterprise, to obtain an effect from the integration of digital twins of the technological process and production facilities, which varies from 5 to 8 percent of the traditional method of creating design and technological documentation; to increase the accuracy of determining the parameters of the components of technical automation equipment by up to 10% compared to the tabular method; to reduce the costs of installation and adjustment of the final automation object by 3%; to increase the accuracy of determining the position of a mobile autonomous robot in space by 6% by implementing the method of combining signals from different types of inertial navigation system sensors; to accelerate the process of analyzing information from sensors of a distributed automated production process control system and making decisions; to increase the accuracy of the digital model of a self-organizing distributed production system by implementing digital twins technology and using unified functional modules.

The reliability of scientific propositions and conclusions is confirmed by the consistency of theoretical research and modeling with the obtained results of experiments on real data, as well as the implementation of the results of the dissertation research on real objects.

Keywords: automated control system, distributed production processes, digital twin self-organization, synthesis, identification, node communities, integration, localization, microservice architecture, optimization, robot manipulator, autonomous mobile robot, trajectory planning, neural network.