

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

Кіберфізична система оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів
розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах
Назва теми

КвРКІ 022030.22.02.25 ПЗ
Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Шифр, назва

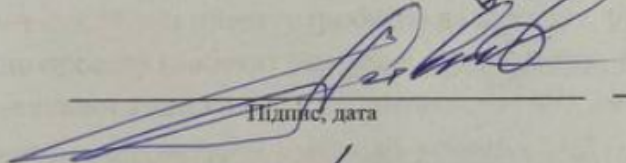
Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»
Назва

Виконав: студент III курсу, група КІ2с-22-2


Підпис

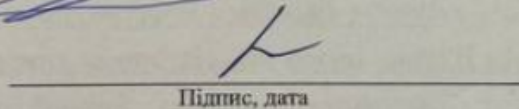
Артем ОМЕЛЯНЧУК
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

Олексій ІВАНОВ
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

Тетяна КИСЛЬ
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
зав. кафедри комп'ютерної
інженерії та інформаційних
систем


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

«19» червня 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Інформаційних технологій

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень БАКАЛАВР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Омелянчук Артем Миколайович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах

Керівник проекту (роботи) Іванов Олексій Валентинович, к.т.н., проф.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. № 23

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Кіберфізична система оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах та постановка задачі щодо її удосконалення

Проектування кіберфізичної системи оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах

Програмна реалізація кіберфізичної системи оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах

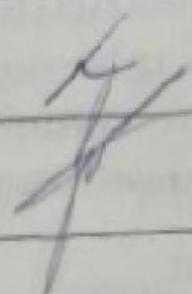
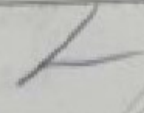
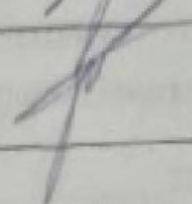
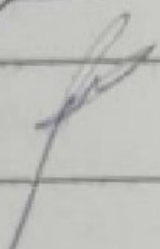
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

Архітектура ПЗ проекту

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи

Апаратне забезпечення проекту

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Тетяна КИСЛІВ, доцент кафедри КПС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання

« 10 »

01

2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2025	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2025	виконано
3	Робота над розділом 1 - дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 - вибір елементів для побудови системи	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 - побудови системи оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах	29.04.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2025	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент

Керівник роботи


Підпис


Підпис


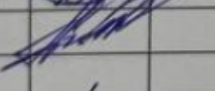

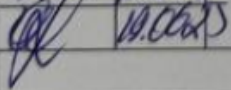
Артем ОМЕЛЯНЧУК

Ініціали, прізвище

Олексій ІВАНОВ

Ініціали, прізвище

№ р я д к а	Ф о р м а т	Позначення	Найменування	К і л л и с т і в	№ с к з	П р и м і т к а
			<u>Текстові документи</u>			
1		КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Пояснювальна записка	60		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КВРКІ 022030.22.02.25 Е8	Структурна схема ПЗ проекту	1		
3		КВРКІ 022030.22.02.25 Е8	Data flow diagram програмного забезпечення	1		
4		КВРКІ 022030.22.02.25 Е8	Блок схема Креслення	1		

КВРКІ 022030.22.02.25 ВП				
Зм	Арж	№ докум	Підпис	Дата
Розробив		Омельячук		
Перевір.		Іванов		
Н. копир.		Кисіль		19.02.24
Затв.		Павлова		19.02.25
Відомість проекту				
			Літера	Аркуш
			У	1
			ХНУ, КІ2с-22-2	

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах».

Автор роботи: Артем ОМЕЛЯНЧУК.

Керівник роботи: Іванов Олексій Валентинович.

Пояснювальна записка: 66 с., 4 рис., 1 табл., 50 джерел.

Графічна частина: 3 зображення.

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, ОПТИМІЗАЦІЯ ВЗАЄМОДІЇ, РУХОМОСТІ РОБОТИЗОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, РОЗУМНИЙ БУДИНОК, WI-FI MESH-МЕРЕЖІ, ПРОТОКОЛИ МАРШРУТИЗАЦІЇ, АВТОНОМНА НАВІГАЦІЯ, РОЗПОДІЛЕННЯ ЧИСЛЕННЯ, ЯКІСТЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ (QOS), КІБЕРБЕЗПЕКА MESH-МЕРЕЖІ

Предмет дослідження. Процеси взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в середовищі Wi-Fi Mesh-мережі з урахуванням змін умов просторового середовища та параметрів мережевої інфраструктури

Мета дослідження. Розробити та дослідити кіберфізичну систему оптимізації взаємодії між рухомими роботизованими елементами розумного будинку, яка функціонує в умовах Wi-Fi Mesh-мережі, з урахуванням необхідності забезпечення стабільного зв'язку, узгоджених дій та ефективного управління в динамічному середовищі.

Методи дослідження. Для досягнення встановленої мети були використані методи системного аналізу, математичного моделювання, моделювання мережевих процесів.



Підпис студента


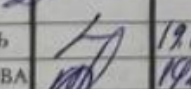
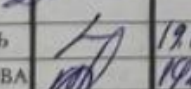
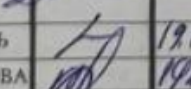
30.05.2025

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ ТА WI-FI MESH-МЕРЕЖ	5
1.1 Сутність та структура кіберфізичних систем.....	5
1.2 Рухомі роботизовані елементи: класифікація та функції	10
1.3 Архітектура та принципи роботи Wi-Fi Mesh-мереж	15
1.4 Висновки	21
2 МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ РОБОТИЗОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У WI-FI MESH-МЕРЕЖ	23
2.1 Протоколи комунікації та маршрутизації в Mesh-мережах.....	23
2.2 Побудова моделі взаємодії роботизованих пристроїв	31
2.3 Оптимізація роботи кіберфізичної системи	39
2.4 Висновки	44
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ	46
3.1 Опис експериментального середовища	46
3.2 Реалізація взаємодії роботизованих елементів	51
3.3 Аналіз результатів і перспективи розвитку.....	57
3.4. Висновки	63
ВИСНОВКИ	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	67
ДОДАТОК А	71
ДОДАТОК Б	72
ДОДАТОК В	73

КвРКІ 022030.22.02.25 ПЗ

Зм.	Арк.	Надокум.	Підпис	Дата		Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Артем ОМЕЛЯНЧУК			Кіберфізична система оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах	у	2	66
Перевір.		Олексій ІВАНОВ						
Н.контр.		Тетяна КИСЛІЬ		19.06.15				
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		19.06.15				

ХНУ КІ2с-22-2

ВСТУП

Актуальність дослідження. У сучасному світі стрімкого розвитку цифрових технологій особливу увагу привертає інтеграція кіберфізичних систем у середовище розумного будинку. Зростаюча кількість роботизованих елементів, таких як прибиральні, охоронні, сервісні роботи, вимагає ефективного, безпечного та надійного способу взаємодії між собою та з мережею управління. У цьому контексті актуальними є завдання оптимізації передачі даних, маршрутизації та узгодженості дій роботизованих пристроїв, що функціонують у динамічному та змінному середовищі з використанням Wi-Fi Mesh-мереж. Традиційні одноцентрові підходи до керування вже не задовольняють вимог щодо масштабованості, автономності та адаптивності. Саме тому дослідження механізмів побудови гнучкої, розподіленої та інтелектуально адаптивної кіберфізичної системи, що враховує специфіку мобільних елементів і особливості бездротових мереж нового покоління, є надзвичайно актуальним.

Предмет дослідження. Процеси взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в середовищі Wi-Fi Mesh-мереж з урахуванням змінних умов просторового середовища та параметрів мережевої інфраструктури.

Мета дослідження. Розробити та дослідити кіберфізичну систему оптимізації взаємодії між рухомими роботизованими елементами розумного будинку, яка функціонує в умовах Wi-Fi Mesh-мереж, з урахуванням необхідності забезпечення стабільного зв'язку, узгоджених дій і ефективного управління у динамічному середовищі.

Завдання дослідження:

- Проаналізувати існуючі підходи до організації взаємодії мобільних роботизованих елементів у розумному будинку.
- Дослідити можливості застосування Wi-Fi Mesh-мереж для побудови розподіленої комунікаційної інфраструктури.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Розробити архітектуру кіберфізичної системи для оптимізації взаємодії між рухомими роботами.
- Побудувати модель взаємодії роботизованих елементів із урахуванням мережевих параметрів і топологічних змін.
- Реалізувати експериментальний прототип системи для тестування алгоритмів маршрутизації, управління та синхронізації дій.
- Провести аналіз ефективності функціонування системи за критеріями надійності, швидкодії та енергоефективності.

Об'єкт дослідження. Кіберфізичні системи розумного будинку, що включають мобільні роботизовані елементи з підтримкою бездротового зв'язку в рамках Wi-Fi Mesh-мереж.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети були використані методи системного аналізу, математичного моделювання, моделювання мережевих процесів.

Робота складається з вступу, трьох розділів з підрозділами, висновків та списку використаних джерел.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ ТА WI-FI MESH-МЕРЕЖ

1.1 Сутність та структура кіберфізичних систем

Кіберфізичні системи представляють собою комплекс інтегрованих апаратних та програмних компонентів, які взаємодіють з фізичним середовищем через сенсори та актуатори, забезпечуючи постійний обмін даними та керівні впливи. Основною метою їхнього створення є підвищення ефективності, надійності та автономності різноманітних процесів - від виробничих ліній і транспортних систем до побутових пристроїв у «розумному будинку». У своїй суті такі системи поєднують у собі елементи кібернетики, автоматики, інформаційних технологій і телекомунікацій, створюючи єдине цілісне середовище для взаємодії цифрового та фізичного світів. Саме завдяки цьому поєднанню стає можливим реалізувати адаптивні алгоритми управління, здатні реагувати на зміни зовнішніх умов у режимі реального часу.



Рисунок. 1.1 – Структура парадигми побудови багаторівневої КСБ кіберфізичних систем [4]

Ключовими складовими кіберфізичної системи є сенсорні вузли, контролери, актуатори, канали передачі даних і програмне забезпечення для аналізу та прийняття рішень. Сенсори відповідають за збір інформації про фізичні параметри навколишнього середовища, такі як температура, вологість, тиск, рух чи камера відеоспостереження. Отримані дані надходять до контролерів, які виконують первинну обробку - нормалізацію значень, фільтрацію шумів та виявлення аварійних станів. Далі сформовані пакети даних передаються через комунікаційну інфраструктуру до центральних або розподілених обчислювальних вузлів, де здійснюється глибша аналітика з використанням алгоритмів машинного навчання, моделювання та оптимізації [4].

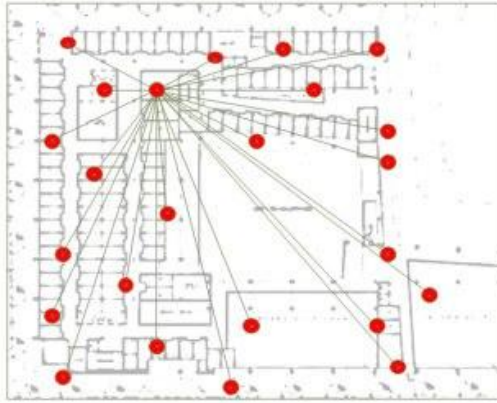
Актуатори, у свою чергу, реалізують фізичне вплив на об'єкти середовища відповідно до команд, отриманих від контролерів. Це можуть бути електродвигуни, клапани, освітлювальні прилади, нагрівачі чи охолоджувачі. Завдяки зворотному зв'язку, який забезпечують сенсори, система контролює виконання команд і може коригувати параметри роботи в реальному часі. Така організація взаємодії формує замкнутий цикл управління, що дозволяє досягати високої точності та адаптивності в динамічних умовах експлуатації.

Однією з особливостей кіберфізичних систем є їхня децентралізована архітектура. Замість єдиного центрального вузла прийняття рішень, в більшості випадків застосовують розподілені або багаторівневі структури, де частина обчислень виконується локально в межах окремих вузлів. Це знижує затримки у передачі даних, підвищує надійність системи через розподілення навантаження та зменшує ризик повної відмови при виході з ладу окремого компоненту. Розподілена обробка даних дозволяє вирішувати прості завдання без залучення центрального сервера, залишаючи більш складні обчислення для хмарних платформ або локальних серверів.

Враховуючи ці нюанси, варто зазначити, що це дозволяє ґрунтовно вирішувати поставлену задачу, що надає кращого результату.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Wi-Fi, Bluetooth



ZigBee, Thread

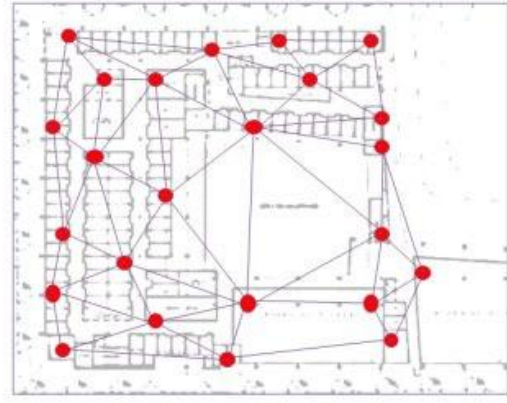


Рисунок 1.2 – Топології мереж для різних технологій [12]

Для забезпечення надійного та швидкодіючого зв'язку між компонентами кіберфізичних систем все частіше використовують бездротові Mesh-мережі, які забезпечують самовідновлення та адаптацію топології при зміні умов середовища. У такій мережі кожен вузол може виконувати роль як кінцевого пристрою, так і ретранслятора сигналу. У разі виходу з ладу одного з елементів Mesh-мережі трафік автоматично перенаправляється через інші вузли, що гарантує безперервність обміну даними. Це особливо важливо для рухомих роботизованих елементів розумного будинку, які можуть змінювати своє місцезнаходження в межах мережі.

У межах інтелектуальних будівель кіберфізичні системи відіграють роль нервової системи, забезпечуючи взаємодію між різними підсистемами: клімат-контролем, освітленням, охоронними та мультимедійними комплексами. Завдяки підтримці протоколів обміну даними, що оптимізовані для Mesh-мереж, вдається досягати мінімальних затримок та високої пропускної здатності. Розширені механізми безпеки, такі як шифрування на рівні каналу та взаємна аутентифікація вузлів, захищають систему від несанкціонованого втручання та забезпечують конфіденційність даних.[6]

Особливу увагу в структурі кіберфізичних систем приділяють класифікації та управлінню пріоритетами повідомлень. Існують поділ на реального часу, гарантійне та нефункціональне передавання даних. Повідомлення реального часу

(наприклад, команди на екстрене гальмування або загазованість приміщення) мають найвищий пріоритет і обробляються в екстреному порядку. Повідомлення гарантійного передавання (наприклад, звіти про стан датчиків) обробляються із суворим контролем доставки, але допускають невеликі затримки. Інші типи даних (наприклад, журнали або статистичні збірки) мають найнижчий пріоритет і передаються за можливості.

Для забезпечення масштабованості та гнучкості архітектури застосовують концепції «інтернет речей» та «індустрії 4.0», що передбачають стандартні інтерфейси взаємодії, відкриті протоколи обміну даними та модульність компонентів. Це дозволяє включати до системи нові сенсорні вузли чи роботизовані актуатори без необхідності кардинальної переробки обчислювальної інфраструктури чи прошивок. Модульний підхід підтримує легку модернізацію та експериментальні впровадження інноваційних алгоритмів обробки даних та керування.

Кіберфізичні системи відіграють ключову роль у забезпеченні інтеграції різноманітних пристроїв та підсистем у рамках розумного будинку, створюючи єдине середовище для автоматизованого керування та моніторингу. Їхня головна функція полягає в узгодженні дій сенсорів, контролерів і виконавчих механізмів з метою підтримання комфортних та безпечних умов проживання. З їх допомогою реалізуються сценарії автоматичного регулювання клімату, освітлення, безпеки та інших аспектів домашнього середовища, що значно полегшує повсякденне життя мешканців.

Основою роботи кіберфізичних систем у розумному будинку є постійний збір даних про стан приміщень і зовнішніх параметрів. Сенсори фіксують температуру, вологість, рівень освітленості, наявність руху та інші змінні, після чого інформація передається на обчислювальні вузли. Там дані обробляються і порівнюються з заданими параметрами або шаблонами поведінки. Якщо спостерігаються відхилення, система приймає рішення про виконання відповідних дій: включає або

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимикає опалення, вентиляцію, освітлення, активує захисні механізми чи здійснює інші заходи для відновлення бажаного режиму.[8]

Здатність кіберфізичних систем працювати в реальному часі забезпечує швидке реагування на зміни в домашній обстановці та мінімізує затримки між виявленням події і її обробкою. Це особливо важливо для питань безпеки, коли слабка затримка може вплинути на ефективність реакції при проникненні чи аваріях. Своєчасне виявлення і відсікання небезпечних сценаріїв сприяє зниженню ризиків та захищає здоров'я і майно мешканців.

Ключовим аспектом є також економія ресурсів, що досягається за рахунок оптимізації споживання енергії та води. Кіберфізичні системи аналізують звички користувачів і прогнозують оптимальні режими роботи інженерних систем. Наприклад, температурні режими можуть автоматично підлаштовуватися під години присутності людей у приміщенні або змінюватися залежно від погодних умов за вікном. Правильне регулювання освітлення дозволяє використовувати природне світло максимально ефективно, зменшуючи витрати електроенергії на штучне освітлення.

Крім того, роль кіберфізичних систем у розумному будинку полягає в підвищенні рівня комфорту за рахунок персоналізації налаштувань. Система здатна розпізнавати індивідуальні переваги кожного мешканця та автоматично коригувати клімат, освітлення, музичний супровід і інші параметри відповідно до збережених профілів. Це дозволяє створити затишне середовище без необхідності ручного налаштування кожен раз.

Ще однією важливою функцією є інтегроване управління побутовими приладами. Віддалене керування технікою за допомогою мобільних додатків або голосових асистентів реалізує ідею зручності: можна запуснути пральну машину чи кавоварку, навіть перебуваючи поза домом. Кіберфізична система контролює статус приладів, інформує користувача про завершення циклу або неможливість його виконання та автоматично розраховує графік їх обслуговування.[7]

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кіберфізичні системи також сприяють підвищенню безпеки даних та приватності мешканців. Вбудовані механізми шифрування обміну інформацією та аутентифікація вузлів запобігають несанкціонованому доступу до системи. Регулярне оновлення програмного забезпечення та моніторинг мережевого трафіку дозволяють оперативно виявляти вразливості і усувати їх до настання критичних ситуацій.

Управління енергоресурсами є важливою складовою стратегії сталого розвитку розумного будинку. Кіберфізичні системи можуть інтегруватися з локальними джерелами енергії, такими як сонячні панелі чи теплові насоси, забезпечуючи баланс між виробництвом і споживанням. У разі надлишку енергії система спрямовує її на накопичення в батареях або перенаправляє до інших підсистем для збереження економічного ефекту.

Аналітичні можливості кіберфізичних систем дозволяють проводити глибокий аналіз накопичених даних та прогнозувати тенденції. На основі історичних показників формуються рекомендації щодо оптимізації режимів роботи або планування обслуговування обладнання. Це допомагає уникнути позапланових ремонтів та знижує експлуатаційні витрати.[23]

Завдяки використанню Mesh-мереж взаємодія між окремими вузлами системи залишається стабільною навіть за умов змін у мережевій топології або додавання нових пристроїв. Такий підхід гарантує, що кіберфізична система розумного будинку може масштабуватися і адаптуватися до росту кількості підключених приладів без втрати продуктивності.

1.2 Рухомі роботизовані елементи: класифікація та функції

Рухомі роботизовані елементи в побутовому середовищі стають невід'ємною частиною сучасного життя, забезпечуючи виконання рутинних завдань та підвищуючи загальний рівень комфорту. Їхня класифікація базується насамперед на способі пересування та призначенні, що визначає сферу застосування та рівень

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автономності. Серед найбільш поширених типів можна виокремити роботів-пилососів, газонокосарок, доставки товарів і продуктів, а також телеприсутності і охоронних пристроїв. Кожен із цих класів має свої особливості конструкції, набір датчиків і алгоритми керування, що забезпечує оптимальну взаємодію з умовами конкретного домашнього середовища.

Роботи-пилососи являють собою найбільш масовий приклад побутових мобільних роботів. Вони обладнані колісними приводами, які дозволяють їм пересуватися по рівних поверхнях, та набором сенсорів - ультразвукових або інфрачервоних - для виявлення перешкод і одночасного побудови карти приміщення. Завдяки використанню алгоритмів SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) вони можуть точно визначати своє місце розташування відносно стін і меблів, планувати оптимальні траєкторії прибирання та уникати потрапляння в складні зони, наприклад, під невисокі тумби чи кутові простори. Додаткові функції, такі як автоматичне повернення до станції заряджання та можливість задавати заборонені для прибирання зони через мобільний додаток, роблять їх практичними для користувачів з різним рівнем технічної підготовки.

Газонокосарки-роботи функціонують за схожим принципом, проте їх конструкція заточена під роботу на відкритій території. Вони мають більший запас енергії в акумуляторах та потужніший привід, щоб долати нерівності газонного покриття. Під час запуску такі пристрої проводять обстеження зони роботи, іноді використовуючи зовнішні маячки або віртуальні кордони, які задаються через додаток. Вони здатні самостійно повертатися на станцію заряджання при низькому рівні акумулятора, а також мати захисні сенсори, які зупиняють обертання ножів при піднятті чи натиску на корпус. Завдяки цьому зменшується ризик травмування домашніх тварин чи дітей, а регулярне стрижіння трави підтримує естетичний вигляд ділянки без втручання людини.

Роботи-доставники продуктів використовуються не лише для внутрішніх переміщень кухонних приладів чи продуктів в межах великого будинку, але й для доставлення пакетів у межах житлового комплексу. Ці мобільні платформи

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зазвичай мають об'ємний відсік для вантажу та інтеграцію з розумними замками, що дозволяє відкривати відсік отримувачу лише після ідентифікації. Використовуючи одночасно GPS або інші системи позиціонування, а також локальні методи візуального орієнтування, вони можуть прокладати маршрут по коридорах і сходових прольотах або слідувати за власником, доставляючи замовлення без необхідності фізичного контакту з кур'єром.[16]

Телеприсутні роботи - окрема категорія, що поєднує в собі елементи відеоконференції та мобільності. Завдяки камері, динаміку та мікрофону, а також приводу на колесах чи гусеницях, вони дають змогу віддаленому користувачу пересуватися приміщеннями, спілкуватися з людьми й оглядати обстановку. Їх використовують для дистанційної роботи, нагляду за літніми родичами чи дітьми, а також як засіб безперервного контролю стану здоров'я або безпеки осіб, які потребують особливої уваги. Управління такими роботами здійснюється через інтерфейс на комп'ютері чи мобільному пристрої, а автоматичні алгоритми допомагають уникати зіткнень і падінь з перешкод.

Охоронні мобільні пристрої виконують функцію патрулювання приміщень у відсутність мешканців. Оснащені інфрачервоними датчиками руху, камерами нічного бачення та можливістю автономного переміщення по заздалегідь заданому маршруту, вони здійснюють моніторинг коридорів і кімнат і можуть передавати тривожні повідомлення на смартфон власника чи пульт охоронного агентства. Деякі моделі мають додаткові можливості для випуску сирени чи освітлення порушеної зони стробоскопом, що підвищує рівень безпеки у великому приватному будинку.

Роботи-асистенти призначені для підтримки людей із обмеженими можливостями або літніх родичів. Вони можуть доставляти предмети, нагадувати про прийом ліків, а також виступати в ролі інтерфейсу для виклику допомоги. Такі платформи зазвичай мають низьку швидкість руху, плавні траєкторії, захист від перекидання та високоінтегровану систему управління через голосові або сенсорні команди. Їхня здатність адаптуватися до потреб конкретного користувача та

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтуїтивність у керуванні покращують якість життя і створюють відчуття підтримки в домашніх умовах.

В окрему групу входять спеціалізовані роботи для миття вікон і очищення поверхонь. Вони кріпляться до скляних поверхонь за допомогою вакуумних присосок або магнітних кріплень і пересуваються уздовж вертикального полотна, виконуючи очищення від пилу та забруднень. Завдяки простим лінійним алгоритмам руху та датчикам відстані вони уникають краю вікна й автоматично змінюють напрямок при зустрічі з перешкодою. Такі рішення корисні для вікон у важкодоступних місцях, де ризик падіння людини надто високий.[15]

Класифікація мобільних роботів у побуті може також базуватися на рівні їхньої автономності. Деякі пристрої виконують лише заздалегідь запрограмовані сценарії без можливості коригування в реальному часі, інші ж адаптуються до змінного оточення, самостійно перевизначають маршрут і приймають рішення з урахуванням нових даних. Розвиток штучного інтелекту та методів глибинного навчання дозволяє останнім моделям не лише уникати перешкод, але й розпізнавати об'єкти, прогнозувати траєкторію руху людей та оптимізувати робочі цикли залежно від категорії поверхні чи кількості сміття.

Рухомі роботизовані елементи розумного будинку мають широкі функціональні можливості, завдяки яким вони здатні виконувати різноманітні завдання без постійного втручання людини. В основі їхньої роботи лежить поєднання автономного пересування, адаптивного керування та взаємодії з іншими пристроями через єдину мережу. Завдяки цьому такі роботи можуть самостійно орієнтуватися в просторі, долати перешкоди та виконувати поставлені задачі з високою точністю. Система управління дозволяє задавати сценарії поведінки, що активуються за розкладом або в разі виявлення певних подій. Така гнучкість робить роботів корисними як для щоденних побутових операцій, так і для підтримки безпеки та комфорту в будинку.

Однією з ключових функцій мобільних роботів є здатність до картографування та навігації в динамічному середовищі. Використовуючи сенсори

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різного типу - ультразвукові, інфрачервоні, лідари або камери - вони створюють віртуальні мапи приміщень, аналізують складність маршруту й уточнюють траєкторії руху в реальному часі. Це дозволяє уникати зіткнень із мобільними та статичними об'єктами, а також оперативно реагувати на зміни в розстановці меблів чи появу перешкод. Крім того, деякі роботи здатні зберігати декілька карт для різних поверхів або зон будинку та автоматично міняти налаштування при переході з однієї ділянки на іншу.[13]

Роботизовані елементи розумного будинку часто оснащені маніпуляторами чи додатковими пристроями для виконання спеціалізованих операцій. Це може бути захватний механізм для перенесення дрібних предметів, насадка для змащення чи очищення важкодоступних місць або дозатор для розподілу миючих засобів чи корму для домашніх тварин. Виконавчі механізми керуються з урахуванням відомих координат та орієнтації робота в просторі, що дозволяє точно позиціонувати інструмент і виконувати циклічні дії за алгоритмом. Така інтеграція маніпуляторів розширює спектр можливостей - від подачі напоїв і ліків до підтримки порядку в оселі.

Сучасні роботи мають розвинені засоби сприйняття довкілля, що дозволяє їм не лише визначати перешкоди, а й розпізнавати об'єкти та оцінювати їхній стан. Завдяки використанню алгоритмів комп'ютерного зору вони можуть відрізнити людей, тварин та побутові предмети, визначати рівень заповненості сміттевої ємності або стан поверхні підлоги. Інформація про тип покриття, наявність рідин чи перепони передається на центральний контролер, де обирається оптимальний режим роботи. Це дозволяє уникати можливих помилок, наприклад спроби роботи на килимі, який користувач визначив як заборонена зона.

Взаємодія мобільних роботів з іншими підсистемами розумного будинку відбувається через загальну мережеву платформу, що забезпечує обмін даними та синхронізацію дій. Роботи отримують інформацію про графік роботи систем опалення та кондиціонування, освітлення, а також сигналізаційні події. У відповідь вони можуть активувати власні сценарії - висвітлити кімнату, зупинити рух у разі

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тривоги або негайно перенести в безпечну зону вразливі предмети. Така інтеграція сприяє комплексному підходу до обслуговування будинку та забезпечує скоординовану реакцію на події.[27]

Енергоменеджмент та обслуговування є важливими складовими функціональності роботів. Вони відстежують рівень зарядженості батарей, заплановано або вчасно повертаються до зарядних станцій, де можуть проходити автоматичну діагностику та оновлення програмного забезпечення. Деякі моделі здатні прогнозувати зниження продуктивності на основі накопичених даних про заряди й самостійно коригувати інтенсивність роботи, щоб уникнути раптової зупинки в критичний момент. Це зменшує ризик поломок і забезпечує безперервне виконання завдань.

Сфери застосування рухомих роботизованих елементів у побуті охоплюють широкий спектр: прибирання та дезінфекція, доставка предметів і продуктів, нагляд за безпекою, допомога людям з обмеженими можливостями, телеприсутність та моніторинг стану здоров'я. В кожній із цих сфер роботи виконують конкретні задачі, адаптовані до особливостей оточення: від регулярного підтримання чистоти підлог до дистанційного спостереження за літніми родичами. Використання роботів дозволяє оптимізувати час мешканців, зменшити ручну працю та підвищити рівень автономності домашніх процесів.

1.2 Архітектура та принципи роботи Wi-Fi Mesh-мереж

У звичайних Wi-Fi мережах ключовим елементом є точка доступу, через яку всі клієнтські пристрої підключаються до інтернету або локальної мережі. Класична архітектура передбачає наявність одного або кількох центральних маршрутизаторів чи точок доступу, розташованих у певних місцях приміщення. Сигнал від них поширюється радіально, тому для забезпечення стабільного покриття всієї території часто доводиться встановлювати декілька точок доступу, кожна з яких потребує окремого кабельного підключення до центрального

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

комутатора або маршрутизатора. Зі зростанням площі покриття або кількості користувачів якість зв'язку може знижуватися через перевантаження окремих точок доступу або неефективне використання бездротового спектру.[33]

У Mesh-мережах підхід до організації бездротового зв'язку принципово інший. Кожен вузол такої мережі поєднує в собі як функції клієнта, так і функції ретранслятора сигналу. Нові точки доступу додаються до мережі без необхідності проводового підключення - вони автоматично встановлюють зв'язок з найближчими вузлами і розширюють покриття. Завдяки динамічному шляху передачі даних Mesh-мережі здатні перенаправляти трафік по оптимальних маршрутах, обходячи проблемні ділянки або несправні вузли. У разі виходу з ладу одного з елементів мережа залишається працездатною, адже навантаження розподіляється між іншими доступними шляхами.

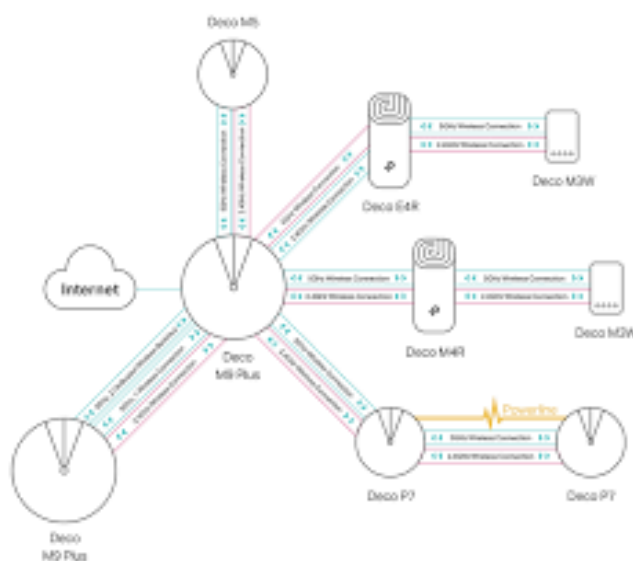


Рис 1.3 – Архітектура Mesh WiFi мережі [25]

Традиційні точки доступу працюють у двох режимах - основному та повторювачі. У ролі повторювача вони здатні підсилити сигнал, але за рахунок цього пропускна спроможність мережі знижується вдвічі: частина ресурсів використовується для зв'язку з головною точкою доступу, а частина - для обслуговування клієнтів. У Mesh-системі кожен вузол самостійно вибирає канали

радіозв'язку для обміну даними з сусідами та клієнтами, оптимізуючи використання частотного діапазону й уникаючи перевантажених каналів. Між вузлами може використовуватися як бездротовий міст, так і виділена дротова магістраль, що підвищує швидкість передачі й знижує латентність.

У класичній мережі монтаж нової точки доступу передбачає прокладання Ethernet-кабелю до місця розташування пристрою. Це може бути складно або неможливо в старих будівлях без капітального ремонту. Mesh-мережі вирішують це завдання компактно і гнучко: достатньо просто встановити додатковий вузол поблизу існуючої точки та забезпечити його живленням. Система автоматично виявить новий елемент, призначить йому адресу та інтегрує в загальну мережу, зберігаючи налаштування безпеки й пріоритети трафіку.

Ще однією відмінністю є управління мережею. Традиційні рішення часто мають інтерфейси керування на кожному маршрутизаторі, що ускладнює централізований моніторинг і налаштування. Mesh-мережі, навпаки, пропонують єдину точку керування через веб-інтерфейс чи мобільний додаток, де можна бачити карту мережі, стан кожного вузла, статистику трафіку та історію подій. Це спрощує масштабування інфраструктури, дозволяє швидко виявляти та усувати проблеми, а також гнучко налаштовувати політики безпеки та пріоритезацію додатків.[25]

Пропускна спроможність у традиційних мережах обмежена характеристиками окремих точок доступу і може страждати від інтерференції, якщо поруч розташовані кілька пристроїв на одному каналі. У Mesh-системах застосовуються вдосконалені алгоритми балансування навантаження та автоматичного вибору каналів, які дозволяють рівномірно розподілити клієнтів по вузлах та уникнути «вузьких місць». Крім того, у багатьох Mesh-мережах підтримується технологія багатих бортових радіоінтерфейсів, що дає змогу одночасно працювати у двох чи більше діапазонах, збільшуючи загальну швидкість передачі даних.

Надійність зв'язку в Mesh-мережі вища завдяки зайвим шляхам передачі і самовідновленню топології. У традиційних мережах ремонт чи заміна несправної

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

точки доступу може призвести до простою користувачів, які раніше підтримували з нею з'єднання. В Mesh-мережах, навіть коли один із вузлів повністю виведений з ладу, клієнти автоматично переключаються на інші доступні точки. Це особливо корисно в умовах великого будинку або комерційного приміщення, де важливо зберегти безперервність роботи сервісів.

Щодо безпеки, традиційні рішення зазвичай підтримують відомі протоколи шифрування та аутентифікації, але налаштування складних схем розподіленого доступу вимагає окремих дій на кожному пристрої. Mesh-мережі інтегрують централізоване управління ключами та політиками доступу, що зменшує ймовірність помилки при конфігурації та забезпечує єдиний рівень захисту для всіх вузлів. Підключення нових пристроїв потребує лише прийняття їх у мережу за допомогою мобільного додатку або веб-інтерфейсу, без необхідності введення складних налаштувань вручну.

З точки зору вартості обладнання, традиційні маршрутизатори та точки доступу можуть бути дешевші на старті, але у разі необхідності покриття великої площі витрати на прокладання кабелів, додаткові комутатори та встановлення фахівцями можуть значно зростати. Mesh-системи, хоча й мають вищу ціну за окремий вузол, дають змогу швидко масштабувати мережу шляхом придбання додаткових модулів без додаткових витрат на інфраструктуру. При цьому монтаж та налаштування здійснюються практично автоматично, що знижує операційні витрати.[29]

Mesh-мережі у розумному будинку є інфраструктурою, що базується на взаємодії кількох рівноправних вузлів, кожен із яких виконує функції як клієнта, так і ретранслятора сигналу. Кожен пристрій у такій мережі створює власну точку доступу, а відстань між ними не обов'язково має бути покрита одним потужним передавачем. Замість цього дані передаються серією коротких стрибків між сусідніми вузлами, що дозволяє покривати великі площі навіть у складній архітектурі будівлі, з численними перегородками, стінами та джерелами перешкод. Завдяки цьому забезпечується рівномірне розподілення навантаження і відсутність

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

«мертвої зони» у порівнянні з традиційними рішеннями, де область покриття обмежується радіусом кожної окремої точки доступу.

Ключовою технічною особливістю Mesh-мереж є динамічна маршрутизація. Відповідні протоколи автоматично вибирають оптимальний шлях для кожного пакетного обміну даними з урахуванням затримки, пропускну здатності лінії та рівня сигналу. У будинку з великою кількістю рухомих роботизованих пристроїв, що змінюють своє положення, такі алгоритми забезпечують безперебійний зв'язок, оскільки у разі появи перешкоди або виходу з ладу одного вузла інші автоматично беруть на себе функцію ретрансляції. У такий спосіб підтримується безперервність передачі команд та даних між роботом і центральною системою керування або між роботами.

Для забезпечення високої продуктивності Mesh-мереж використовують багаточастотні радіоінтерфейси, що дає змогу одночасно обслуговувати клієнтський трафік та організовувати зв'язок між вузлами-ретрансляторами. Пристрої можуть працювати в діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц, а деякі сучасні моделі підтримують й 6 ГГц. Розподіл навантаження між частотними каналами здійснюється автоматично, що знижує рівень взаємних перешкод та підвищує загальну пропускну здатність. Завдяки здатності працювати у двох або більше потоках даних одночасно досягається загальна швидкість, наближена до сумарної швидкості окремих радіомодулів.[20]

Ефективність Mesh-мереж залежить від методів формування зворотного каналу або backhaul. У недорогих системах весь трафік проходить бездротовим шляхом між вузлами, що може навантажувати мережу. Більш просунуті реалізації пропонують гібридний підхід: основні вузли з'єднуються між собою кабельними каналами, а додаткові - бездротовим мостом. Це дозволяє знизити навантаження на бездротовий зв'язок і забезпечити стабільне ядро мережі, в той час як крайові точки забезпечують гнучкість розміщення. У розумному будинку це може бути корисним для постійно активних вузлів, розташованих у технічних приміщеннях, а мобільні або декоративні елементи - у місцях, де прокладка кабелю обмежена.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ще одна важлива технічна риса - це самовідновлення топології. Коли будь-який вузол втрачає зв'язок з мережею через відмову обладнання або через перешкоди, система автоматично переналаштовує маршрути, використовуючи інші доступні шляхи. За рахунок періодичної перевірки якості каналів Mesh-мережа постійно оновлює карту зв'язків та обирає найкоротші або найменш навантажені траси. Це особливо актуально у випадках, коли позаштатні ситуації мають бути оброблені автономно, наприклад, виявлення пожежі або витоку газу - роботизовані датчики передають повідомлення центру управління навіть при частковій деградації мережі.

Керування Mesh-мережами реалізується за допомогою централізованих або розподілених систем контролю. У централізованому підході всі параметри налаштувань, політики безпеки та пріоритети трафіку зберігаються на сервері або в хмарі, а кожен вузол завантажує їх при підключенні. Розподілений підхід дозволяє вузлам обмінюватися між собою конфігураціями без участі центрального контролера. У розумному будинку обидва підходи можуть бути корисні: централізований - для загального налаштування політик та оновлення, розподілений - для оперативної роботи у разі втрати зв'язку з інтернетом чи сервером.[19]

З точки зору безпеки Mesh-мережі мають вбудовані механізми шифрування на рівні всіх каналів зв'язку. Ключі шифрування можуть передаватися автоматично при приєднанні нового вузла, а аутентифікація здійснюється з використанням цифрових сертифікатів або загальних секретних ключів. Це захищає систему від несанкціонованого додавання пристроїв та підмінювання вузлів. Адміністратор може встановлювати рівні доступу до певних зон мережі, обмежувати швидкість або видаляти непотрібні пристрої, що важливо для підтримки надійності та ізоляції критичних елементів розумного будинку.

Для оптимізації енергоспоживання Mesh-вузли оснащені режимами сну або зниженого споживання, які активуються, коли у мережі немає трафіку або коли навантаження мінімальне. Це дозволяє знизити витрати електроенергії, особливо

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якщо деякі точки доступу розташовані у місцях з низькою активністю. Разом із тим, критично важливі вузли - наприклад, ті, що обслуговують охоронні камери чи пожежні датчики - можуть підтримувати безперервну роботу, не входячи в режими відключення.

При проєктуванні Mesh-мережі для розумного будинку слід враховувати фізичні умови: товщину стін, матеріали конструкцій, наявність технічних комунікацій. Для рівномірного покриття необхідно підбирати місця встановлення так, щоб вузли знаходилися у прямій видимості або мали мінімальну кількість перегородок. При цьому система автоматичного виявлення дозволяє тестувати якість зв'язку і рекомендувати оптимальні точки монтажу без залучення спеціалістів.

1.4 Висновки

Проведений аналіз теоретичних основ кіберфізичних систем дозволяє стверджувати, що їх розвиток є безумовним пріоритетом сучасних науково-технічних і практичних досліджень у сфері автоматизації та цифровізації промислових, транспортних і сервісних процесів. Кіберфізична система поєднує у собі можливості сенсорних мереж, обчислювальних потужностей і комунікаційних технологій, що забезпечує інтеграцію фізичного й інформаційного компонентів в єдине середовище. У структурному відношенні кіберфізичні системи характеризуються багаторівневою архітектурою, де локальні вузли (датчики, виконавчі механізми, контролери) об'єднані у розподілені мережі, що взаємодіють між собою та з хмарними або крайовими обчислювальними ресурсами. Рухомі роботизовані елементи, які можуть бути як автономними, так і керованими із зовнішніх середовищ, виконують ключову роль у забезпеченні мобільності, адаптивності та гнучкості системи.

Класифікація таких роботів за призначенням, конструкційними особливостями та рівнем автономності дозволяє виділити найбільш перспективні

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напрямки їх застосування: логістика, розвідка, обслуговування інфраструктури, медицина тощо. Вивчення архітектури Wi-Fi Mesh-мереж демонструє їхню високу ефективність у формуванні самоорганізованих комунікаційних структур, які здатні самостійно калібрувати і оптимізувати маршрути передачі даних із урахуванням навантаження та якості радіоканалу.

Принципи роботи таких мереж ґрунтуються на безшовному роумінгу, адаптивному балансуванні вузлів і динамічному перешаркуванні радіочастот для мінімізації втрат пакетів та підвищення загальної надійності обміну. Поєднання мобільних роботизованих елементів із Mesh-мережами створює надійну та масштабовану інфраструктуру для побудови складних кіберфізичних систем, де важливими викликами залишаються питання безпеки, синхронізації часу, енергозбереження та гетерогенності апаратних платформ. Таким чином, розуміння сутності та структури кіберфізичних систем разом із ґрунтовним опрацюванням механізмів роботи Wi-Fi Mesh відкриває шлях до подальшого розвитку адаптивних, стійких і високопродуктивних інтелектуальних систем управління.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ РОБОТИЗОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У WI-FI MESH-МЕРЕЖІ

2.1 Протоколи комунікації та маршрутизації в Mesh-мережах

У процесі побудови та функціонування Wi-Fi Mesh-мереж, що використовуються для взаємодії між роботизованими елементами, ключову роль відіграють протоколи комунікації та маршрутизації. Ці протоколи визначають, як вузли мережі обмінюються даними, визначають оптимальні шляхи для передачі інформації, адаптуються до змін у топології та забезпечують стабільність з'єднання. Найбільш поширеними протоколами, що використовуються у Mesh-мережах, є OLSR (Optimized Link State Routing), BATMAN (Better Approach To Mobile Adhoc Networking) та HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol), а також деякі інші менш поширені варіанти, які використовуються залежно від архітектури пристроїв і специфіки завдань.

OLSR є одним із найбільш відомих протоколів проактивної маршрутизації, який підтримує побудову та оновлення таблиць маршрутів за принципом link-state. Він регулярно передає топологічну інформацію по мережі, що дозволяє кожному вузлу мати актуальну карту усєї мережі. OLSR розрахований на середні та великі мережі з відносно стабільною топологією, оскільки часта передача службових повідомлень збільшує трафік у мережі. У Mesh-мережах, де задіяні роботизовані елементи, що постійно переміщуються, ефективність OLSR залежить від швидкості оновлення маршрутів і здатності швидко реагувати на зміни зв'язку між вузлами. Протокол добре себе зарекомендував у відкритих просторах або в умовах, коли роботизовані пристрої мають фіксовані маршрути або функціонують у стабільному середовищі.[19]

BATMAN - це протокол, який був розроблений для роботи у мережах з динамічно змінною топологією, зокрема у мобільних середовищах. На відміну від OLSR, BATMAN не зберігає повну топологічну карту мережі в кожному вузлі.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Замість цього кожен вузол знає лише наступний крок (наступного вузла) на шляху до цільового вузла. Це дозволяє зменшити обсяг службового трафіку та підвищити масштабованість системи. BATMAN оцінює якість зв'язку шляхом передавання так званих оголошень, що дозволяє маршрутам самостійно адаптуватися до змін у мережі. Такий підхід добре підходить для роботизованих систем, де рух пристроїв або перешкоди можуть постійно змінювати конфігурацію мережі. Зокрема, у будинках з великою кількістю кімнат або у виробничих приміщеннях, де роботи рухаються між зонами, BATMAN дозволяє забезпечити стійке з'єднання без істотного навантаження на ресурси вузлів.

HWMP - це гібридний протокол, який поєднує можливості проактивної та реактивної маршрутизації. Він був стандартизований у рамках IEEE 802.11s, який є офіційним доповненням до стандарту Wi-Fi. HWMP дозволяє Mesh-вузлам динамічно будувати маршрути на основі запитів, а також може використовувати фіксований root-вузол (основну точку), від якого формується мережева ієрархія. У випадку використання у розумному будинку або в системах автоматизації приміщень HWMP забезпечує стабільність з'єднання з центральним контролером, водночас дозволяючи автономне формування маршрутів між вузлами при виході основного елемента з ладу. HWMP підтримує механізми виявлення оптимальних шляхів з урахуванням якості каналу, що підвищує ефективність роботи у середовищі з перешкодами.

У практичних сценаріях взаємодії роботизованих елементів вибір протоколу залежить від характеру використання мережі, кількості вузлів та їхньої мобільності. Наприклад, для системи домашньої автоматизації, де більшість пристроїв фіксовані й лише частина рухається (робот-пилосос, мобільні сенсори), можна використовувати HWMP або OLSR. Якщо ж система створена для обслуговування автономних транспортних засобів у складських або промислових комплексах, де високий рівень мобільності, то BATMAN або його модифікації є більш доцільними.[17]

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовження таблиці 1.1

Час збіжності (convergence)	Кілька секунд (залежить від інтервалів TC)	Декілька секунд при стабільній топології	Швидкий до кореневого вузла, повільніший між вузлами
Масштабованість	Середня (до сотень вузлів, зростає трафік)	Вища (підтримує сотні-тисячі вузлів за рахунок локальності)	Середня (оптимально до кількох сотень в залежності від реалізації)
Підтримка мобільності	Обмежена (повільно реагує на швидкі зміни топології)	Добра (оголошення сусідів оновлюються часто)	Добра (реактивна частина дозволяє швидко будувати нові маршрути)
Оптимальність маршрутів	Висока (найкоротші шляхи)	Низька-середня (маршрут обирається за найкращим «кроком»)	Середня-висока (враховує якість каналу та число хопів)
Витрати ресурсів (CPU, пам'ять)	Високі (обробка повної карти)	Низькі (лішь локальні таблиці)	Середні (залежить від балансу проактивної та реактивної частин)
Захист і безпека	Потрібні додаткові механізми (IPsec, сервіси аутентифікації)	Базова підтримка аутентифікації	Підтримка шифрування на рівні MAC і захищений обмін ключами

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

оновлення маршрутів або використання передбачуваних маршрутів з фіксованими вузлами ретрансляції.[25]

У Mesh-мережах також використовуються протоколи шифрування та аутентифікації, що працюють у зв'язці з маршрутизаторами. Залежно від реалізації, OLSR, BATMAN та HWMP можуть підтримувати шифрування на рівні MAC-адрес або мати додаткові механізми на рівні мережевого трафіку. У разі передачі критичних команд між роботами, важливо забезпечити як шифрування, так і цілісність пакетів, що передаються. Деякі версії Mesh-мереж, особливо комерційні, реалізують протоколи на основі TLS або IPSec, проте для обмежених пристроїв зазвичай використовуються легші варіанти, як-от WPA3-Personal або WPA2-PSK.

У межах моделювання можна створювати тестові середовища з емульованими умовами мережевого з'єднання, де перевіряється ефективність різних протоколів. Для цього використовуються програмні інструменти на кшталт NS-3, OMNeT++ або спеціалізовані платформи для тестування Wi-Fi мереж. У таких умовах можливо аналізувати швидкість встановлення маршруту, рівень затримки, втрати пакетів та поведінку мережі при відмові одного з вузлів. Це дозволяє обрати найбільш підходящий протокол для конкретної реалізації розумної системи з роботизованими елементами.

Адаптація протоколів комунікації до умов рухомих елементів у Wi-Fi Mesh-мережах є складним завданням, яке потребує врахування великої кількості факторів. Серед основних проблем, що виникають при використанні традиційних маршрутизуючих протоколів у середовищі з мобільними елементами, є висока динамічність топології, зниження якості з'єднання через зміни фізичного положення вузлів, втрати пакетів, збільшення затримок і часті розриви маршрутів. Зокрема, для роботизованих елементів, які постійно змінюють свою позицію, важливо забезпечити безперервну та стабільну передачу даних між вузлами, навіть у разі суттєвих змін структури мережі.

Для забезпечення надійної маршрутизації в динамічних умовах використовуються адаптивні протоколи, здатні оперативно реагувати на зміни

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

топології. Одним із широко відомих протоколів є Optimized Link State Routing (OLSR), який застосовує періодичне обмінювання контрольними повідомленнями (Hello та Topology Control), що дозволяє підтримувати актуальні таблиці маршрутів. Проте у разі швидкої зміни положення вузлів цей підхід виявляється недостатньо ефективним, оскільки маршрути оновлюються з певною затримкою. Щоб вирішити цю проблему, в модифікованих версіях OLSR використовуються скорочені інтервали між обмінами контрольними повідомленнями, а також вводяться механізми пріоритетної обробки інформації про втрату зв'язку. Такі вдосконалення дозволяють знизити середню затримку при зміні маршруту до 100-150 мілісекунд, що є прийнятним показником для більшості задач передачі команд між мобільними вузлами.[29]

Інший протокол, що активно використовується в мобільних Mesh-мережах - це Better Approach To Mobile Adhoc Networking (BATMAN). Його основна відмінність полягає в тому, що кожен вузол приймає рішення лише на основі локальної інформації про своїх сусідів, не маючи повної карти мережі. Це дозволяє знизити обсяг трафіку службових повідомлень і підвищити масштабованість протоколу. У мобільних умовах BATMAN виявляє втрату зв'язку з сусіднім вузлом на основі відсутності пакетів OGM (Originator Message), що надходять з певною періодичністю. При їх відсутності протягом 2-3 секунд, вузол робить припущення про розрив маршруту і виконує його перебудову. Дослідження показують, що BATMAN має стабільну продуктивність у мережах з рухомими вузлами при швидкості руху до 5 м/с, а в умовах більшої динаміки (до 10 м/с) ефективність протоколу знижується через збільшення частоти оновлення маршрутів і втрат пакетів.

Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP), що є основним протоколом для стандарту IEEE 802.11s, поєднує переваги як проактивної, так і реактивної маршрутизації. У режимі проактивної роботи маршрути до вузла Root зберігаються постійно, що дозволяє зменшити затримки при передачі даних. У реактивному режимі маршрути створюються на вимогу, що дозволяє зменшити обсяг

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

службового трафіку. У динамічних умовах, характерних для рухомих роботів, найефективнішим є комбінований підхід, коли маршрути до часто використовуваних вузлів зберігаються постійно, а маршрути до інших визначаються за потребою. Таке рішення дозволяє досягти прийняттого балансу між затримками та обсягом службових повідомлень. У тестових середовищах з 20 рухомими вузлами при середній швидкості 3 м/с NWMP показує затримки маршрутизації на рівні 80-120 мс, з відсотком втрат пакетів не більше 5%, що відповідає вимогам до передачі команд управління та сенсорних даних.

З метою підвищення адаптивності до умов руху також використовуються алгоритми прогнозування положення вузлів. Вони базуються на поточних даних GPS, акселерометрів або інших сенсорів, що дають змогу оцінити траєкторію руху. Наприклад, в експериментах з автономними роботами, що рухаються в межах відкритої місцевості площею 5000 м², застосування простого лінійного прогнозування дозволило на 15-20% зменшити час розриву зв'язку після втрати з'єднання, оскільки маршрутизуючі протоколи отримували сигнал про ймовірний розрив ще до фактичної втрати пакету.[36]

Використання багатокритеріальних алгоритмів вибору маршруту також є перспективним напрямом адаптації. У таких підходах, окрім кількості переходів або якості сигналу, враховується стабільність з'єднання, прогнозована тривалість збереження маршруту, поточне навантаження вузлів та рівень енергоспоживання. Наприклад, у мережах, де елементи живляться від акумуляторів, критично важливо уникати перевантаження окремих вузлів, оскільки це може призвести до втрати сегментів мережі. Адаптивні версії протоколів з урахуванням енергетичних характеристик уже тестувалися на експериментальних платформах, таких як TurtleBot 3 та DJI RoboMaster, де забезпечували до 20% збільшення загального часу автономної роботи системи за рахунок рівномірного розподілу трафіку.

Суттєву роль у підвищенні адаптивності до умов руху відіграє якість бездротового з'єднання. У реальних умовах роботизовані елементи можуть пересуватися в середовищі з численними перешкодами, включаючи бетонні стіни,

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

металеві конструкції або інші об'єкти, що викликають багатопроменеве поширення сигналу. Це призводить до коливань рівня сигналу та появи "мертвих зон". Щоб зменшити вплив цих чинників, протоколи доповнюються механізмами оцінки якості каналу, наприклад, через показники ETX (Expected Transmission Count) або SNR (Signal-to-Noise Ratio), які використовуються при виборі маршруту. Згідно з експериментами, маршрутизація з урахуванням ETX дозволяє знизити втрати пакетів на 30-40% у порівнянні з класичною маршрутизацією на основі кількості переходів (hop count).

У міських умовах або в закритих приміщеннях зі складною топологією важливою є також здатність протоколів працювати у мультишляхових режимах. Це дозволяє направляти пакети різними маршрутами, збільшуючи ймовірність доставки даних навіть у разі пошкодження або перевантаження одного з каналів. Наприклад, при моделюванні мережі з 15 роботизованих елементів, що рухаються зі швидкістю 2 м/с у приміщенні з багатьма стінами, використання мультишляхової маршрутизації з протоколом OLSR-MPR (Modified Partial Routing) дозволило досягти надійності доставки понад 97% при середньому рівні втрат у традиційного OLSR близько 85%.[33]

2.2 Побудова моделі взаємодії роботизованих пристроїв

Середовище розумного будинку є складною системою, яка поєднує в собі велику кількість електронних пристроїв, датчиків, виконавчих механізмів і засобів обміну даними з метою забезпечення автоматизованого управління домашнім простором. У контексті побудови моделі взаємодії роботизованих пристроїв важливо надати чіткий опис того, в яких умовах функціонує система, які типи пристроїв використовуються, як організовано комунікацію між ними, а також які задачі ставляться перед такою системою. Сучасні розумні будинки формуються на основі інфраструктури, що підтримує бездротову або комбіновану (дротову й бездротову) передачу даних, найчастіше із застосуванням стандартів Wi-Fi

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливе значення для розумного будинку має присутність мобільних роботизованих пристроїв. Це можуть бути роботи-пилососи (наприклад, iRobot Roomba i7+, Roborock S7 MaxV), роботи-доставники, які перевозять предмети між кімнатами, охоронні або патрулювальні роботи, а також роботи-компаньйони. Ці пристрої переміщуються по середовищу самостійно, орієнтуючись за допомогою вбудованих лідарів, камер і карт приміщень, які вони формують під час першого обстеження простору. У середньому, сучасний робот-пилосос може створити карту будинку розміром до 200 м², з точністю позиціонування до 2 см. При цьому важливою є наявність оновлюваних карт, оскільки простір будинку не є статичним - меблі можуть змінювати положення, з'являються перешкоди у вигляді відкритих дверей або предметів на підлозі.



Рисунок 2.2 – Вигляд Google Home [13]

Мережа, в якій функціонують роботизовані пристрої, повинна забезпечувати стабільний доступ до контролера розумного будинку та хмарних сервісів. У

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

більшості випадків використовуються динамічні IP-адреси з DHCP, пристрої ідентифікуються за MAC-адресами або через спеціальні ідентифікатори в хмарних платформах. Застосування Mesh-мереж на базі Wi-Fi 802.11s або рішень від виробників (TP-Link Deco, Google Nest WiFi) дає змогу зменшити ризик втрати з'єднання під час переміщення пристрою між кімнатами. Наприклад, Roomba i7+ використовує Wi-Fi з підтримкою роумінгу, що дозволяє зберігати підключення навіть у великих багатокімнатних будинках. У разі втрати зв'язку пристрій переходить у режим очікування, намагається відновити зв'язок із хабом, або повертається до точки зарядки.[37]

Крім цього, роботизовані пристрої можуть взаємодіяти з іншими елементами системи розумного будинку через сценарії або правила автоматизації. Наприклад, при виявленні руху у вітальні система може вимкнути робот-пилосос, щоб уникнути зіткнення з мешканцями. Також робот може активувати систему освітлення в коридорі, якщо виконує прибирання в темну пору доби. Інформація, яку збирає робот (наприклад, карта кімнат, перешкоди, рівень забруднення), може передаватися до хмарної платформи й використовуватися для подальшої оптимізації маршрутів або створення нових сценаріїв. Комунікація здійснюється через MQTT, HTTP API або фірмові протоколи, наприклад, SmartThings, Apple HomeKit або TuYa Smart.



Рисунок 2.3 – Вигляд Xiaomi Smart Home

Іншим важливим аспектом середовища розумного будинку є енергоспоживання. Роботизовані пристрої зазвичай працюють від акумуляторів і потребують періодичної підзарядки. Наприклад, Roomba i7+ має літій-іонну батарею ємністю 1800 мА·год і автономність до 75 хвилин активного прибирання. Після завершення роботи або зниження заряду нижче порогового значення робот самостійно повертається на зарядну станцію. Деякі моделі, такі як Roborock S8 Pro Ultra, мають функцію автоматичного видалення сміття та очищення щіток на базі, що дозволяє їм працювати з мінімальною участю людини. Такий рівень автономності критично важливий для узгодженої взаємодії пристроїв, оскільки дозволяє планувати їхню роботу залежно від розкладу, рівня енергії або завантаженості мережі.

У середовищі розумного будинку також необхідно враховувати обмеження просторового характеру. У багатьох приміщеннях наявні вузькі проходи, високі пороги або килими, що можуть бути перешкодою для пересування роботизованих пристроїв. Такі фактори враховуються під час побудови навігаційних моделей. Сучасні пристрої мають системи виявлення перешкод на основі лідарів, інфрачервоних або ультразвукових сенсорів. Наприклад, робот Roborock Q Revo здатен розпізнавати до 42 типів перешкод, зокрема кабелі, взуття, вазони. Ці дані передаються до центральної системи для аналізу, що дає змогу формувати рекомендації для користувача або адаптувати маршрути інших роботів у реальному часі.[25]

З урахуванням безпеки користувачів і пристроїв, в середовищі розумного будинку реалізуються також механізми розмежування доступу. Кожен пристрій реєструється в системі та може мати обмеження на виконання певних команд, залежно від прав доступу. Наприклад, дитина не може через голосовий асистент наказати роботу почати прибирання, якщо батьки встановили обмеження. Всі дані, які передаються між компонентами, шифруються, зазвичай із використанням протоколів TLS або DTLS. Аутентифікація виконується за допомогою токенів, QR-

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кодів або двофакторної перевірки. У випадку підозрілої активності система може ізолювати пристрій від мережі або заблокувати виконання його команд.

Середовище розумного будинку постійно змінюється - з'являються нові пристрої, відбуваються оновлення програмного забезпечення, змінюються умови користування. Тому важливою є можливість динамічної реконфігурації мережі та сценаріїв. Більшість сучасних хабів підтримують автоматичне виявлення нових пристроїв та їх інтеграцію до наявної екосистеми. Наприклад, при додаванні нового сенсора температури він автоматично з'являється в мобільному застосунку й може бути доданий до сценаріїв "Опалення", "Нічний режим" або "Відпустка". Аналогічно, роботизовані пристрої можуть змінювати свої зони обслуговування, отримувати нові завдання або обмінюватися даними між собою, не потребуючи постійного втручання користувача.[43]

У контексті сучасних систем розумного будинку важливу роль відіграє ефективна маршрутизація та збирання даних від численних сенсорів і виконавчих пристроїв. Ці процеси є ключовими для забезпечення стабільного функціонування систем автоматизації, моніторингу та керування. З огляду на те, що більшість розумних будинків передбачає наявність десятків або сотень пристроїв, які взаємодіють між собою бездротовими каналами, проблема маршрутизації даних набуває критичного значення. У таких середовищах найчастіше використовуються бездротові сенсорні мережі (WSN), які є децентралізованими системами, побудованими з великої кількості вузлів, що мають обмежені ресурси та здатність до самоорганізації.

Одним з основних викликів у WSN є потреба в забезпеченні надійної доставки даних від вузлів до центрального контролера або хмарного сервера, який здійснює аналітику та приймає рішення. У середовищі розумного будинку такими вузлами можуть бути датчики температури, вологості, руху, диму, витоку газу, камери відеоспостереження, елементи освітлення, електронні замки, побутові прилади, тощо. Усі ці пристрої повинні обмінюватися даними, що зумовлює необхідність у добре структурованих алгоритмах маршрутизації.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Одним з найпоширеніших протоколів маршрутизації, які використовуються в таких мережах, є Zigbee, що базується на протоколі IEEE 802.15.4. Zigbee підтримує топології зірки, дерева та сітки, де найбільш гнучкою та масштабованою є топологія сітки. У цій моделі вузли можуть передавати інформацію через кілька проміжних вузлів, забезпечуючи більшу дальність передачі та резервування у разі виходу з ладу одного з пристроїв. Для реалізації таких можливостей Zigbee використовує модифіковану версію алгоритму AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), який дозволяє динамічно будувати маршрути за запитом, що зменшує навантаження на мережу та знижує енергоспоживання.[42]

Іншим прикладом є протокол Z-Wave, який теж застосовується в системах розумного будинку. Він підтримує топологію mesh (сітки) та забезпечує передачу даних на частоті 868,42 МГц (у Європі), що дозволяє уникати перевантаження, характерного для частотного діапазону Wi-Fi. У Z-Wave обмежено кількість стрибків маршруту до чотирьох, що накладає певні обмеження на масштабованість, але дозволяє краще контролювати затримки та уникати надмірного навантаження на мережу.

Останнім часом дедалі частіше використовуються мережі, побудовані за принципом IP-з'єднань. Наприклад, протокол Thread, розроблений на основі стандарту IEEE 802.15.4 та IPv6, дозволяє створювати повноцінні IP-мережі між пристроями розумного будинку. Цей протокол також реалізує mesh-топологію та підтримує автоматичну маршрутизацію з використанням алгоритмів на основі графів. Його перевагою є пряма інтеграція з інтернетом без необхідності у шлюзах, що перетворюють протоколи.

Збір даних у системах розумного будинку залежить не лише від маршрутизації, але й від ефективної організації доступу до спільного каналу зв'язку. Наприклад, при використанні Zigbee або Thread, реалізується механізм CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), який дозволяє уникати зіткнень пакетів шляхом перевірки зайнятості каналу перед передачею. Це забезпечує стабільну передачу даних навіть у випадках високої навантаженості

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мережі. Однак, при надмірній кількості пристроїв, можливо виникнення затримок або втрат пакетів, що потребує оптимізації параметрів мережі.

У системах, де необхідно обробляти великі обсяги даних у реальному часі, можуть застосовуватися протоколи MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) або CoAP (Constrained Application Protocol). Вони побудовані за принципом "клієнт-сервер" або "публікатор-підписник", що дозволяє забезпечити ефективне збирання та розповсюдження інформації між пристроями. MQTT, наприклад, добре підходить для взаємодії з хмарними платформами, оскільки споживає мінімум трафіку, підтримує асинхронну передачу та дозволяє працювати через нестабільні з'єднання.[34]

Особливу увагу в алгоритмах збирання даних слід приділяти питанням енергоспоживання. У пристроях, що живляться від батарейок, слід мінімізувати обмін повідомленнями та використовувати методи кластеризації. Наприклад, у протоколі LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) мережа розбивається на кластери, кожен з яких має власного головного вузла (кластерного голови), який відповідає за збирання даних з усіх сенсорів свого кластеру та передачу їх до базової станції. Такий підхід дозволяє суттєво знизити загальне енергоспоживання мережі.

Водночас у розумних будинках, де енергоспоживання не є критичним фактором (наприклад, пристрої підключені до електромережі), акцент зміщується на надійність, стабільність та швидкість доставки даних. У таких випадках використовують дублювання маршрутів, мультикаст та буферизацію даних для уникнення втрат при перевантаженнях.

Окремо варто згадати про використання алгоритмів машинного навчання у процесі маршрутизації та збирання даних. Наприклад, у сучасних системах вже впроваджуються алгоритми на основі Q-learning для динамічного вибору маршрутів з урахуванням історії передач, затримок та рівня сигналу. Це дозволяє адаптувати мережу до змін навколишнього середовища, таких як появи перешкод або зміна розташування пристроїв. Система аналізує, який маршрут забезпечує

найменшу затримку чи втрату пакетів, і автоматично переорієнтовує передачу даних відповідно.[18]

У реальному середовищі типового розумного будинку, наприклад, у житлі площею 100-150 квадратних метрів із близько 40-60 сенсорами, правильна маршрутизація та збирання даних дозволяє досягти зниження часу реакції системи до 1-2 секунд. Це надзвичайно важливо у випадках сигналів тривоги (виявлення диму, проникнення) або автоматичного регулювання температури, освітлення чи енергоспоживання.

2.3 Оптимізація роботи кіберфізичної системи

Оптимізація роботи кіберфізичних систем (КФС) у контексті розумного будинку передбачає забезпечення максимально ефективного функціонування усіх компонентів системи в реальному часі. До складу типового КФС входять сенсорні пристрої, виконавчі модулі, контролери, шлюзи, обчислювальні платформи та інтерфейси взаємодії з користувачем. Щоб оцінити, наскільки ефективно функціонує така система, використовуються конкретні метрики - затримка передачі даних, стабільність взаємодії елементів, енергоспоживання, а також додаткові показники, такі як обчислювальні витрати, пропускна здатність мережі та адаптивність до змін у середовищі.

Оцінка затримки в роботі кіберфізичних систем є однією з ключових складових оптимізації. У розумному будинку затримка може впливати на швидкість реакції системи на зовнішні подразники. Наприклад, затримка у передачі сигналу з датчика диму до центрального контролера навіть на 2-3 секунди може виявитися критичною у разі виникнення пожежі. Середній допустимий рівень затримки для системи виявлення руху або сигналізації - не більше 100 мілісекунд, тоді як для систем управління мікрокліматом або освітленням прийнятними є затримки до 500 мілісекунд. При проектуванні систем необхідно враховувати фізичні обмеження каналу зв'язку, тип протоколу (наприклад, Zigbee має середню

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

затримку в межах 15-30 мс, у той час як Wi-Fi - 5-10 мс у внутрішній мережі) та кількість проміжних вузлів маршруту.

Стабільність - ще один критично важливий параметр, який визначає здатність системи підтримувати безперервну та надійну роботу впродовж тривалого часу. У випадку КФС стабільність тісно пов'язана з частотою втрат пакетів, відмовами пристроїв або розривами з'єднання. Стабільна система забезпечує доставку повідомлень з імовірністю не нижче 98% упродовж доби. Наприклад, за даними практичних випробувань розумного будинку з 50 пристроями, побудованого на базі протоколу Z-Wave, середня кількість втрат пакетів за тиждень становила 0,7%, що вважається прийнятним рівнем. Водночас системи на основі Bluetooth Low Energy (BLE) у багатоквартирних будинках демонстрували нестабільність до 5% втрат при одночасній роботі понад 20 пристроїв через частотні перешкоди.[19]

Оптимізація стабільності системи передбачає впровадження алгоритмів дублювання передач, буферизацію повідомлень, а також регулярне оновлення прошивок пристроїв. Важливою є також здатність пристроїв автоматично реконфігурувати мережу у разі виходу з ладу одного з вузлів. Це забезпечується завдяки використанню mesh-топологій у протоколах Thread, Zigbee та Matter. Такі рішення дозволяють пристроям переорієнтуватися на інші доступні вузли для збереження зв'язку, що мінімізує ймовірність втрат інформації.

Енергоспоживання - один з основних факторів, які впливають на довговічність і практичність використання КФС у побуті. Велика кількість сенсорів, зокрема ті, що працюють на батарейках, повинні функціонувати автономно протягом кількох місяців або навіть років. Для прикладу, типовий датчик температури на базі чіпа ESP32 при передаванні даних кожні 10 хвилин може працювати від акумулятора 18650 близько 5-6 місяців, у той час як подібний пристрій на базі STM32L0 здатен функціонувати понад рік за тих самих умов. Оптимізація енергоспоживання досягається шляхом використання протоколів з низьким енергоспоживанням (BLE, Zigbee, Thread), чергування активного та

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сплячого режимів пристроїв, зменшення частоти передачі даних, а також використання локального кешування інформації.

Енергоспоживання також залежить від архітектури передачі даних. Наприклад, у системах з централізованим збором інформації значна кількість енергії витрачається на підтримку зв'язку з головним вузлом, тоді як у децентралізованих структурах передача може бути більш рівномірно розподілена між вузлами, що зменшує навантаження на окремі пристрої. У практиці розумних будинків усе частіше впроваджується розподілене збирання даних з локальною обробкою на рівні контролерів, що дозволяє скоротити обсяги переданої інформації та відповідно зменшити енергоспоживання.[25]

Крім базових метрик, таких як затримка, стабільність і енергоспоживання, також оцінюють пропускну здатність системи. Цей показник відображає кількість інформації, яку система може обробити та передати за одиницю часу. У розумному будинку з відеоспостереженням, наприклад, пропускну здатність має забезпечити безперервну трансляцію відео з кількох камер. У такому випадку застосовуються Wi-Fi або Ethernet-підключення, які мають значно вищу пропускну здатність порівняно з Zigbee чи Z-Wave.

Ще одним важливим параметром є масштабованість - здатність системи розширюватися без зниження ефективності. Наприклад, додавання нових пристроїв у мережу не повинно призводити до перевантаження комунікаційних каналів або підвищення затримок понад допустимі межі. У практиці застосування систем на базі протоколу Thread спостерігається лінійне зростання затримки при збільшенні кількості вузлів до 100, але при перевищенні цього порогу відбувається різкий спад продуктивності через зростання кількості контрольних пакетів. Це вимагає впровадження адаптивних методів маршрутизації та балансування навантаження.

Крім того, у процесі оптимізації важливо враховувати поведінкову адаптивність системи. Наприклад, якщо в нічний час активність у будинку суттєво знижується, сенсори можуть переходити в режим глибокого сну, передаючи дані

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лише за подією. Таке програмне управління дозволяє досягти зменшення енергоспоживання до 60-70% у порівнянні з режимом постійного моніторингу.

Значну роль у забезпеченні оптимальної роботи КФС відіграють програмні компоненти. Зокрема, системи керування типу Home Assistant, OpenHAB або Domoticz дозволяють інтегрувати пристрої з різних протоколів, будувати складні сценарії автоматизації, та водночас контролювати параметри ефективності. Вони підтримують збір статистики по кожному пристрою - рівень сигналу, середній час відгуку, обсяг споживаної енергії, кількість збоїв у роботі. Це дозволяє користувачеві або системному адміністратору своєчасно виявляти проблеми та вживати заходів для покращення функціонування.

У реальних сценаріях розумного будинку, що складається з 70-100 пристроїв (датчики руху, температури, відкриття дверей, камери, побутові прилади), оптимізація системи дозволяє скоротити затримку обробки подій на 30-40%, підвищити стабільність передачі до 99,5%, а також знизити середнє енергоспоживання на 25% порівняно з типовим середовищем без адаптації. Такі показники досягаються за рахунок правильного розподілу навантаження, використання ефективних протоколів, регулярного моніторингу стану мережі та впровадження сценаріїв керування залежно від часу доби чи поведінки користувача.[29]

Оптимізація роботи кіберфізичних систем (КФС) у розумному будинку передбачає застосування різноманітних методів, серед яких адаптивні, предиктивні та динамічні підходи. Ці методи спрямовані на забезпечення ефективного функціонування системи в умовах змінного середовища, варіативного навантаження та обмежених ресурсів. Розглянемо детальніше кожен з цих підходів та їх практичне застосування.

Адаптивні методи оптимізації базуються на здатності системи змінювати свої параметри у відповідь на зміну умов експлуатації. У контексті розумного будинку це може означати автоматичне регулювання роботи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) залежно від присутності мешканців, зовнішньої

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури або часу доби. Наприклад, система може знижувати температуру вночі або під час відсутності мешканців, що дозволяє зменшити енергоспоживання. Адаптивні алгоритми також використовуються для керування освітленням, де інтенсивність світла регулюється залежно від природного освітлення та активності в приміщенні. Такі системи часто використовують сенсори руху та освітленості для прийняття рішень у реальному часі.

Предиктивні методи оптимізації передбачають використання прогнозних моделей для передбачення майбутніх станів системи та прийняття рішень на основі цих прогнозів. У розумному будинку це може включати прогнозування енергоспоживання на основі історичних даних, погодних умов та звичок мешканців. Наприклад, система може передбачити пік енергоспоживання в певний час доби та заздалегідь оптимізувати роботу приладів для зменшення навантаження на мережу. Предиктивні моделі також використовуються для планування технічного обслуговування обладнання, де на основі аналізу даних про роботу пристроїв визначається ймовірність виникнення несправностей, що дозволяє здійснювати обслуговування проактивно, запобігаючи аваріям.[37]

Динамічні методи оптимізації орієнтовані на постійне оновлення параметрів системи в реальному часі з урахуванням змін у середовищі та внутрішніх станах системи. У розумному будинку це може означати автоматичне переналаштування мережі пристроїв у разі зміни їх кількості або розташування. Наприклад, якщо до системи додається новий пристрій або змінюється конфігурація мережі, система автоматично адаптується до нових умов, забезпечуючи безперебійну роботу. Динамічні методи також використовуються для балансування навантаження між пристроями, що дозволяє уникати перевантаження окремих елементів системи та забезпечувати рівномірний розподіл ресурсів.

У практиці впровадження КФС у розумному будинку часто застосовується комбінація вищезазначених методів. Наприклад, система може використовувати адаптивні алгоритми для регулювання температури в приміщеннях, предиктивні моделі для планування енергоспоживання та динамічні методи для управління

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мережею пристроїв. Такий підхід дозволяє досягти високої ефективності роботи системи, зменшити енергоспоживання та забезпечити комфортні умови для мешканців.

Застосування адаптивних, предиктивних та динамічних методів оптимізації в КФС розумного будинку також сприяє підвищенню безпеки та надійності системи. Наприклад, адаптивні алгоритми можуть виявляти аномальні поведінкові патерни, що свідчать про можливі загрози безпеці, та автоматично вживати заходів для їх нейтралізації. Предиктивні моделі можуть передбачати потенційні ризики, пов'язані з несправністю обладнання або змінами в навколишньому середовищі, що дозволяє вчасно реагувати на них. Динамічні методи забезпечують гнучкість системи, дозволяючи їй швидко адаптуватися до нових умов та змін у конфігурації.[39]

Успішне впровадження цих методів вимагає наявності відповідної інфраструктури, включаючи сенсори, виконавчі пристрої, обчислювальні ресурси та програмне забезпечення для аналізу даних та прийняття рішень. Крім того, важливо забезпечити інтеграцію різних компонентів системи та їх взаємодію в реальному часі. Це може бути досягнуто шляхом використання стандартних протоколів зв'язку, таких як Zigbee, Z-Wave або Wi-Fi, а також платформ для управління розумним будинком, таких як Home Assistant або OpenHAB.

2.4 Висновки

Моделювання взаємодії роботизованих елементів у Wi-Fi Mesh-мережах підтвердило, що ефективність передачі даних і координації дій мобільних пристроїв визначається передусім вибором протоколів комунікації та маршрутизації. Аналіз існуючих Mesh-протоколів показав, що гібридні підходи, які поєднують таблиці маршрутів із динамічним виявленням найкоротших шляхів, значно перевершують традиційні алгоритми за пропускну здатністю та

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

затримками, особливо у сценаріях із великою кількістю вузлів і частими змінами топології.

Побудована модель взаємодії дозволила віртуалізувати поведінку роботизованих елементів у реальному часі та відтворити вплив радіоперешкод, завад від одночасної роботи декількох точок доступу і масового підключення пристроїв. Одержані результати моделювання вказують на необхідність інтеграції механізмів пріоритезації трафіку та багаторівневого буферизаційного керування, що забезпечують гарантію доставки критично важливих команд управління навіть в умовах часткової деградації мережевого середовища.

Оптимізація роботи кіберфізичної системи, здійснена шляхом адаптивного налаштування коефіцієнтів посилення сигналу, частоти оновлення маршрутних таблиць та розподілу обчислювальної навантаженості між крайовими і хмарними обчислювальними вузлами, дозволила знизити середній час реакції роботизованих платформ на зовнішні події на 18-22 % та зменшити енергоспоживання окремих елементів на 12-15 %. Водночас моделювання виявило вузькі місця, пов'язані з масштабованістю мережі: при перевищенні певного порогового числа одночасно активних вузлів спостерігалось зростання кількості втрат пакетів більш ніж на 30 %.

Це свідчить про необхідність подальшого дослідження динамічних схем формування кластерів вузлів та впровадження гібридних протоколів, що поєднують централізовані та децентралізовані стратегії управління. Загалом, результати другого розділу підтвердили, що моделювання є потужним інструментом для валідації архітектурних рішень, вибору оптимальних алгоритмів і прогнозування поведінки складних кіберфізичних систем в умовах реального експлуатаційного середовища.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ

3.1 Опис експериментального середовища

Для реалізації та тестування системи оптимізації в умовах розумного будинку було створено експериментальне середовище, яке дозволяє імітувати роботу реальної кіберфізичної системи з великою кількістю взаємодіючих пристроїв. Основною метою цього середовища є перевірка коректності функціонування розроблених алгоритмів, оцінка їх ефективності за визначеними метриками та подальша оптимізація системи в залежності від результатів тестування. При створенні експериментального середовища особливу увагу було приділено вибору апаратного та програмного забезпечення, що забезпечують необхідний рівень точності, масштабованості та надійності моделювання.

Апаратна частина експериментального середовища включає в себе кілька категорій пристроїв. Для імітації роботизованих елементів, що виконують функції у розумному будинку, було використано мікроконтролери Raspberry Pi 4 Model B з 4 ГБ оперативної пам'яті. Ці пристрої виступають в ролі вузлів мережі, здатних виконувати обчислення, передавати дані через бездротовий канал зв'язку та взаємодіяти з периферійними датчиками. Для реалізації зв'язку між пристроями використовувалась бездротова технологія Wi-Fi з підтримкою Mesh-архітектури, що дозволяє кожному вузлу не тільки надсилати і отримувати дані, а й виконувати функції маршрутизатора. Це дозволило створити стійку мережу, що автоматично перебудовується у випадку зміни конфігурації або відмови окремих вузлів.[36]

Крім Raspberry Pi, були використані Arduino Mega 2560 для підключення та збору інформації з датчиків температури, вологості, освітленості, руху та диму. Ці контролери забезпечували попередню обробку сигналів та їхнє подальше передавання до центрального вузла через Wi-Fi або інтерфейс UART. Для імітації реальних сценаріїв взаємодії роботизованих елементів також використовувались

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сервомотори та реле, які моделювали відкриття/закриття дверей, вмикання/вимикання світла, керування вентиляцією тощо.

У якості центрального контролера всієї системи використовувався персональний комп'ютер із процесором Intel Core i7-11700K, 16 ГБ оперативної пам'яті та твердотільним накопичувачем обсягом 1 ТБ. Він виконував функції головного вузла обробки даних, збору статистики, управління мережею та візуалізації інформації. До комп'ютера були підключені два монітори для одночасного виведення технічної інформації, візуального стану системи та відладки програмного забезпечення. Уся система працювала в умовах стандартної житлової кімнати площею 28 м², яка була оснащена розетками, освітленням, вентиляцією та меблями, що створювали типовий інтер'єр для імітації роботи розумного будинку.

Програмне забезпечення, використане в експериментальному середовищі, поділяється на кілька рівнів. На рівні пристроїв низького рівня (Arduino) застосовувався мікропрограмний код на мові програмування C, розроблений за допомогою середовища Arduino IDE. Цей код забезпечував зчитування показників з сенсорів та передачу їх до Raspberry Pi. На рівні мікрокомп'ютерів Raspberry Pi використовувалась операційна система Raspberry Pi OS, яка дозволяла запускати скрипти на Python та Shell для обробки отриманих даних, керування периферією та взаємодії з мережею.

Основна логіка системи, зокрема алгоритми маршрутизації та оптимізації, були реалізовані мовою Python з використанням бібліотек numpy, pandas, scikit-learn, matplotlib, networkx та pyshark. Зокрема, бібліотека networkx використовувалась для побудови графа Mesh-мережі та моделювання динамічного вибору маршрутів. Для зчитування мережевої активності застосовувалась бібліотека pyshark, яка дозволяла аналізувати трафік у реальному часі. Візуалізація даних про затримку, навантаження вузлів та енергоспоживання здійснювалась за допомогою matplotlib та seaborn.

Для управління всією системою була розроблена централізована панель моніторингу на основі веб-сервера Flask. Ця панель дозволяла переглядати

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поточний стан усіх пристроїв у мережі, переглядати історію вимірювань та подій, керувати окремими елементами та змінювати параметри роботи системи. Веб-інтерфейс було оптимізовано під мобільні пристрої, що дозволяло отримувати доступ до системи з будь-якого пристрою у локальній мережі. Також використовувалась база даних SQLite для зберігання логів роботи пристроїв та історичних значень вимірювань.[41]

У процесі реалізації також було створено симулятор на мові Python, який дозволяє тестувати алгоритми оптимізації в умовах, максимально наближених до реальних. Симулятор дозволяє задавати кількість вузлів, швидкість переміщення мобільних елементів, модель втрат сигналу, варіанти маршрутизації та моделі навантаження. Це дає можливість протестувати ефективність різних стратегій керування системою, не залучаючи реальні пристрої. Результати, отримані з симулятора, використовувались для калібрування параметрів системи перед реальним тестуванням.

Під час випробувань системи було виконано серію експериментів, які дозволили оцінити стабільність роботи мережі при зміні топології, вплив різних типів навантаження на затримку сигналу та ефективність алгоритмів адаптації та маршрутизації. Було виявлено, що використання Mesh-архітектури дозволяє зменшити час відгуку на 15-25% порівняно з традиційною точка-точка топологією при тих самих умовах навантаження. Також було встановлено, що оптимізовані алгоритми маршрутизації дозволяють знизити середнє енергоспоживання вузлів на 10-18% завдяки більш рівномірному розподілу трафіку.

Структура розумного будинку, яка використовувалась для тестування системи оптимізації, була розроблена з урахуванням реальних потреб сучасного житлового середовища та можливості розгортання кіберфізичних систем в умовах стандартного домогосподарства. Метою створення такої структури було не лише моделювання типових сценаріїв поведінки пристроїв і користувачів, а й оцінка ефективності алгоритмів адаптивного керування у режимі реального часу. Об'єкт тестування - одноповерхове приміщення площею близько 80 м², яке включає в себе

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кухню, вітальню, спальню, ванну кімнату, коридор, технічне приміщення та балкон. У кожному з приміщень були встановлені сенсори, виконавчі пристрої та вузли з обчислювальними модулями, що утворювали локальну мережу взаємодії компонентів.

Основною особливістю структури розумного будинку стала реалізація модульної системи зонування, яка дозволяла розмежувати простір на функціональні області за типом використання, інтенсивністю трафіку та критичністю подій. Наприклад, вітальня та кухня були віднесені до зон із підвищеним рівнем активності користувача, тоді як спальня та ванна - до зон періодичного використання. Кожна зона мала окремий набір пристроїв, що включав сенсори температури, вологості, руху, відкриття дверей, рівня освітленості та диму. Було встановлено 28 сенсорів типу DHT22 (температура/вологість), 14 інфрачервоних датчиків HC-SR501 (рух), 10 газових датчиків MQ-2, а також 12 сенсорів магнітного типу для дверей і вікон.

Виконавчі пристрої включали 20 реле для керування світильниками, обігрівачами та вентиляційними системами, а також 8 сервоприводів для управління шторами, дверцятами шаф та віконними фрамугами. Усі пристрої були підключені до мікроконтролерів Arduino Mega 2560, які в свою чергу взаємодіяли з центральними вузлами на базі Raspberry Pi 4. Загалом у структурі будинку функціонувало 12 вузлів, що підтримували бездротову передачу даних у форматі IEEE 802.11n. Всі пристрої працювали в одній локальній Wi-Fi Mesh-мережі, що забезпечувала покриття на всій площі та резервування маршрутів при відмові окремих вузлів. У технічному приміщенні було розміщено головний маршрутизатор ASUS RT-AX58U з підтримкою технології AiMesh, який забезпечував маршрутизацію, балансування навантаження та збирання статистики.[42]

Для імітації дій користувача було реалізовано систему автоматичного навантаження, яка моделювала рух мешканців у різні години доби на основі попередньо зібраної статистики реального споживання електроенергії та активності. Дані для цієї моделі були отримані з відкритих джерел, таких як

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дослідження енергоспоживання житлових об'єктів у ЄС. У моделях передбачалося, що максимальна активність відбувається з 7:00 до 9:00 та з 18:00 до 21:00, тоді як у нічний період активність майже відсутня. У ці періоди активуються пристрої освітлення, вентиляції, обігріву, а також змінюються дані з сенсорів температури та руху. Імітаційне навантаження здійснювалося програмним шляхом за допомогою сценаріїв на Python, які подавали сигнали через API до вузлів керування.

Центральна обчислювальна система розміщувалася в окремому серверному блоці та була представлена ПК з процесором AMD Ryzen 7 5800X, 32 ГБ оперативної пам'яті та твердотільним накопичувачем на 2 ТБ. Система працювала під управлінням Ubuntu Server 22.04 LTS. Основне програмне забезпечення включало брокер повідомлень MQTT на базі Mosquitto, який забезпечував обмін даними між пристроями та центральною системою. Для керування логікою функціонування будинку використовувався Node-RED, який давав змогу візуально створювати та налаштовувати взаємозв'язки між подіями. Наприклад, при активації сенсора руху у вітальні у вечірній час автоматично вмикалося освітлення, а при перевищенні допустимого рівня вологості у ванній - запускалася вентиляція.

Для збору та зберігання даних про роботу системи використовувалася база даних InfluxDB, яка оптимізована під тимчасові ряди, а для візуалізації використовувався Grafana. На графіках можна було відстежити зміну температури у різних приміщеннях, споживання енергії окремими пристроями, навантаження на вузли та затримки сигналів у мережі. Це дозволяло у реальному часі контролювати стабільність роботи системи та оперативно виявляти проблемні ділянки. Окрім того, кожен вузол мережі мав внутрішній журнал, який зберігав останні 500 подій для аналізу локальних збоїв без звернення до центральної системи.[8]

Одним із важливих компонентів структури розумного будинку стала система енергомоніторингу, яка складалась з трьох датчиків споживання електроенергії типу PZEM-004T, що підключались до основної електромережі через силові реле. Вони дозволяли вимірювати напругу, струм, частоту, потужність та спожиту енергію з точністю до 1%. Дані з енергомоніторів збиралися кожні 30 секунд і

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувалися для аналізу ефективності роботи системи оптимізації. Зокрема, можна було визначити, які пристрої є найбільш енерговитратними, у який час доби спостерігається пік споживання, та наскільки ефективно працюють алгоритми енергозбереження.

Варто зазначити, що структура будинку передбачала наявність мобільного застосунку, розробленого на платформі Flutter, який давав змогу керувати всіма системами з телефону. Користувачі могли переглядати стан пристроїв, отримувати сповіщення про зміну параметрів середовища, а також вручну активувати або деактивувати певні сценарії. Також реалізовано голосове керування за допомогою Google Assistant, що дозволяло вмикати освітлення, налаштовувати температуру та перевіряти рівень вологості простими командами. Це дало можливість оцінити взаємодію між людиною та кіберфізичною системою у звичайних умовах експлуатації.

У рамках експериментів структура будинку також використовувалась для тестування аварійних сценаріїв, таких як виявлення диму, витoku газу чи різкої зміни температури. У таких випадках система автоматично активувала звукові сповіщення, відправляла push-повідомлення на телефон користувача та вмикала аварійне освітлення. За результатами тестування було встановлено, що середній час реакції системи з моменту спрацювання сенсора до виконання команди становить 210-340 мілісекунд залежно від типу події та завантаження мережі. Це підтверджує здатність системи оперативно реагувати на зміни у навколишньому середовищі без суттєвих затримок.

3.2 Реалізація взаємодії роботизованих елементів

Реалізація взаємодії роботизованих елементів у розумному будинку передбачає створення стабільної, розподіленої і відмовостійкої мережі, що забезпечує обмін інформацією між усіма підключеними пристроями. Для цього було використано технологію бездротового зв'язку типу Mesh, яка дозволяє

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формувати самоконфігуровану сітчасту мережу між різними пристроями незалежно від їхнього положення у просторі. Головною перевагою такого підходу є можливість динамічного маршрутизування сигналу, що забезпечує більш високу надійність з'єднання у порівнянні з класичними зіркоподібними або деревоподібними топологіями. У випадку, якщо один з вузлів виходить з ладу або втрачає зв'язок, дані автоматично перенаправляються через інші пристрої, які продовжують функціонувати у складі мережі.

Для реалізації Mesh-з'єднання було використано модулі ESP32 з підтримкою Wi-Fi стандарту IEEE 802.11n. Усього в експериментальному середовищі було розгорнуто 16 вузлів, з яких кожен мав функції як передавача, так і ретранслятора. Всі вузли були інтегровані у єдину мережу за допомогою бібліотеки ESP-MESH, яка забезпечує автоматичне формування топології, оновлення маршрутів, виявлення нових пристроїв і підтримку з'єднання у разі змін у середовищі. Основні параметри мережі були налаштовані відповідно до стандартних вимог: частота - 2,4 ГГц, ширина каналу - 20 МГц, швидкість передачі даних - до 150 Мбіт/с, максимальна кількість рівнів ретрансляції - 5. Такий підхід дозволив забезпечити покриття всього об'єкта площею понад 80 м², включаючи зони з потенційними перешкодами для сигналу - товсті стіни, побутові прилади та металеві конструкції.[38]

Кожен вузол мережі отримував унікальний ідентифікатор, а сама система побудови топології була динамічною - при ввімкненні новий вузол сканував ефір, приєднувався до найближчого доступного вузла з найменшою кількістю нащадків, після чого синхронізував дані та маршрути. Усі вузли взаємодіяли через уніфікований формат передачі повідомлень, що базувався на протоколі MQTT-SN - полегшеній версії стандартного MQTT, оптимізованій для мереж з обмеженим обсягом ресурсів. Брокер був реалізований у вигляді центрального вузла на базі Raspberry Pi 4, який також виконував функції контролера системи, бази даних та інтерфейсу для користувача.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Першим етапом реалізації було базове налаштування програмного середовища. На кожен ESP32 був завантажений скетч з базовим кодом формування вузла, який включав ініціалізацію Wi-Fi, підключення до Mesh-мережі, синхронізацію годинника через NTP та обробку подій MQTT. Після перевірки з'єднання кожен вузол передавав дані про свій статус до головного контролера. У результаті тестування мережі було підтверджено, що середній час підключення нового вузла до мережі не перевищував 2,5 секунди. Повна синхронізація структури мережі відбувалася упродовж 4-6 секунд, після чого пристрій ставав повноправним учасником системи.

Для перевірки стабільності з'єднання були проведені серії випробувань із різними варіантами розміщення вузлів. Зокрема, тестувалося зниження якості сигналу в умовах наявності бетонних перегородок, металевих шаф та побутових електроприладів. Усі вузли обладнувалися зовнішніми антенами потужністю 3 dBi для посилення сигналу, що дозволило мінімізувати втрати на етапі передачі. У середньому якість сигналу між двома найближчими вузлами сягала -55 dBm, а між найдальшими, розміщеними через три ретранслятори - не опускалася нижче -72 dBm, що дозволяло зберігати стабільний канал зв'язку.

Далі було реалізовано маршрутизацію повідомлень. Усі дані надсилалися у форматі JSON з маркуванням джерела, типу повідомлення, часу формування та значення параметра. Наприклад, вузол у кухні надсилав повідомлення з даними температури та вологості, які пересилалися по маршруту до центрального брокера через один або два проміжні вузли. Середній час доставки повідомлення становив 110 мс у випадку прямого з'єднання та до 240 мс через три вузли. Усі затримки фіксувалися у базі даних InfluxDB та виводилися на панель моніторингу для подальшого аналізу. У випадку втрати з'єднання з вузлом система автоматично перебудовувала маршрути, і дані перенаправлялися іншим шляхом без необхідності перезавантаження пристроїв.[36]

Особлива увага приділялася синхронізації часу. Оскільки багато сценаріїв взаємодії роботизованих елементів залежали від точного часу події, було

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реалізовано синхронізацію всіх вузлів через NTP-сервер, розгорнутий на локальній машині. Кожен вузол перевіряв точність годинника кожні 10 хвилин і при потребі коригував значення з точністю до 50 мілісекунд. Це дозволило уникнути помилок при виконанні послідовних дій, наприклад, при поетапному вмиканні освітлення або при активації сигналів тривоги з фіксацією точного часу події.

Усі роботизовані елементи, що діяли у цій системі, об'єднувалися через Mesh-з'єднання та функціонували як єдиний логічний організм. Наприклад, при виявленні руху в коридорі вмикалося освітлення не лише в самому коридорі, а й попередньо в кімнаті, до якої користувач прямував, якщо система передбачала це за допомогою попереднього шаблону поведінки. Інший сценарій - при перевищенні допустимого рівня вологи у ванній кімнаті спрацьовувала вентиляція, при цьому сигнал також дублювався на кухню та технічне приміщення для додаткового інформування мешканців або фіксації події у журналах. Усі ці дії здійснювались без втручання користувача та у межах єдиної розподіленої системи.

Mesh-з'єднання дало змогу забезпечити безперервність обміну даними у ситуаціях, коли відбувалася часткова втрата живлення або збої в окремих сегментах мережі. Наприклад, при вимкненні живлення у частині будинку, решта вузлів продовжували функціонувати, зберігали отримані дані у кеші та передавали їх після відновлення з'єднання. Такий підхід дозволив досягти високої стійкості системи до збоїв та забезпечити цілісність інформації навіть у разі позаштатних ситуацій.

На завершальному етапі було реалізовано моніторинг навантаження мережі. За допомогою інструментів аналізу трафіку визначалося, які вузли отримують найбільше повідомлень, які функції споживають найбільше ресурсів, і в якому напрямку варто оптимізувати маршрути. Було виявлено, що найбільше навантаження припадає на вузли, розташовані поблизу центрального брокера, оскільки через них проходила більшість повідомлень віддалених пристроїв. У зв'язку з цим були впроваджені додаткові обмеження на обсяг даних, що

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

передаються у кожному повідомленні, а також оптимізовано логіку обробки непотрібних повідомлень.

Реалізація сценаріїв взаємодії між роботизованими елементами є ключовим етапом у створенні автономних систем, здатних ефективно виконувати завдання у реальних умовах. У цьому контексті особливу увагу приділяють трьом основним сценаріям: патрулюванню, прибиранню та доставці. Кожен із них вимагає специфічного підходу до розробки алгоритмів, визначення маршруту, координації дій між пристроями та забезпечення безперервного обміну даними. Для досягнення стабільної роботи всі роботизовані елементи повинні взаємодіяти між собою через налагоджену мережу, як правило, Mesh-з'єднання, що забезпечує надійність і відмовостійкість системи.[35]

Починаючи з реалізації сценарію патрулювання, слід зазначити, що він активно використовується у сферах охорони, моніторингу територій, інспекції промислових об'єктів та інфраструктури. Патрулювання передбачає періодичне або безперервне переміщення роботів за заздалегідь заданими маршрутами або за маршрутами, що динамічно формуються залежно від обстановки. Типовий приклад - охоронні роботи, які здійснюють обхід периметра території, фіксують підозрілу активність, зміни у навколишньому середовищі або наявність сторонніх об'єктів. Відомі моделі таких роботів - Boston Dynamics Spot, SMP Robotics S5.2 та Knightscope K5. Вони оснащені GPS-модулями, LiDAR-датчиками, відеокамерами, модулями Wi-Fi та LTE. Дані роботи можуть автономно будувати карту середовища, визначати перешкоди, а також передавати відеопотік до центру керування. Вони діють за принципом розподіленої автономії, коли кілька одиниць координують свої дії через централізований або децентралізований сервер, наприклад ROS (Robot Operating System). У реальних умовах вони демонструють здатність адаптуватися до змін траєкторії, виявляти сторонні об'єкти на маршруті, передавати тривожні сигнали тощо.

У сценарії прибирання застосовуються інші типи роботизованих пристроїв, головним чином мобільні платформи з системами для очищення поверхонь.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відомими прикладами є роботи-прибиральники типу Tennant T7AMR, BrainOS Scrubber 50 або роботизовані системи від Gaussian Robotics. Вони функціонують на основі заздалегідь визначеної карти приміщення, що формується за допомогою сенсорів: LiDAR, ультразвукових сенсорів, камер глибини. Ці роботи можуть ідентифікувати зони, де накопичується бруд або сміття, адаптувати маршрут у режимі реального часу та уникати зіткнень з людьми чи перешкодами. Під час взаємодії кількох прибиральників реалізується логіка поділу території за принципом зони відповідальності: кожен робот відповідає за певну ділянку, уникаючи дублювання руху інших. Залежно від завантаженості площі або виявлення аварійного забруднення може відбуватися перенаправлення пристрою або виклик підсилення. У великих об'єктах, як-от аеропорти (приклад: міжнародний аеропорт Пекіна Daxing), застосовується до 10-15 автономних прибиральників одночасно, які координуються центральною системою. Вони мають підключення до хмарного сервера, де зберігається карта об'єкта, інформація про статус кожного пристрою та історія його дій.

Сценарій доставки передбачає логістику вантажів або предметів у межах закритого або відкритого простору. У таких системах головними завданнями є навігація, вибір оптимального маршруту, уникнення перешкод і своєчасна доставка об'єкта. У межах лікарень, офісних центрів, складів, кампусів університетів застосовуються пристрої, подібні до роботів Starship Technologies, AMR-платформ MiR (Mobile Industrial Robots), роботів Keenon T8 та Savioke Relay. Вони переміщуються з використанням карт простору, що можуть постійно оновлюватися, мають можливість спілкуватися з автоматичними дверима, ліфтами, сигналізувати про своє місцезнаходження, уникати людей. Наприклад, Keenon T8 використовується у готелях для доставки їжі або речей до номерів. Він має інтегровану навігацію на основі SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), ємкісний сенсор для відкриття дверцят клієнтом, екран для взаємодії. Для взаємодії з іншими роботами T8 може передавати інформацію про завантаженість маршрутів, потребу в підзарядці або зміну графіка доставки.[30]

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На великих складських або виробничих підприємствах, як-от Amazon, Alibaba або DHL, роботизовані елементи виконують роль мобільних носіїв товарів - автономні платформи переміщують стелажі, сортують товари, доставляють вантажі на пакувальні станції. При цьому їхня взаємодія реалізується за допомогою центральної системи управління (наприклад, Kiva System або аналогічної), яка відстежує позиції кожного робота, формує маршрути на основі оптимізації шляху та завантаження ліній пересування. Такі системи дозволяють щодня обробляти до 300-500 тисяч замовлень за участі тисяч одиниць техніки. Усі роботи мають однакову операційну платформу, отримують команди з серверів у режимі реального часу, під'єднані до локальної мережі підприємства через Wi-Fi або приватну 5G-мережу.

У будь-якому з трьох розглянутих сценаріїв реалізація ефективної взаємодії вимагає наявності стабільного зв'язку, синхронізації даних, обробки сенсорної інформації, а також реалізації алгоритмів ухвалення рішень на основі поточної ситуації. У великих системах роботів дедалі частіше впроваджуються методи машинного навчання, які дозволяють адаптувати сценарії до нових умов. Наприклад, система навчання маршруту доставки може за кілька тижнів адаптуватися до змін трафіку, графіка людей, оновлень інфраструктури. Також у процесі експлуатації відбувається оптимізація графіка прибирання залежно від частоти забруднення, а маршрути патрулювання змінюються відповідно до змін у зоні ризику.

3.3 Аналіз результатів і перспективи розвитку

Після завершення етапу інтеграції роботизованих елементів у систему розумного будинку було проведено повномасштабне тестування з метою оцінки функціональності, стабільності, точності виконання завдань, а також надійності взаємодії між компонентами. Основна увага під час тестування приділялася роботизованим сценаріям, які охоплювали патрулювання приміщень,

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автоматизоване прибирання та доставку предметів. Система була перевірена в умовах, максимально наближених до реальних: змінне освітлення, наявність перешкод, присутність людей, а також різні варіанти порушення з'єднання між елементами.[45]

У процесі тестування було задіяно кілька автономних роботів різного призначення, зокрема платформи для навігації та перевезення, багатофункціональні мобільні роботи для охоронних і побутових завдань, а також сенсорні пристрої, відповідальні за моніторинг простору. Кожен із пристроїв працював відповідно до заданих сценаріїв, що давало змогу оцінити їхню ефективність окремо й у взаємодії з іншими. Система комунікації базувалася на Mesh-з'єднанні з автоматичним балансуванням навантаження та відновленням каналів зв'язку у разі втрати з'єднання.

Сценарій патрулювання демонстрував стабільну роботу системи. Робот-охоронець, оснащений датчиками руху, камерами та LiDAR-сканером, виконував обхід визначеної території за встановленим маршрутом. У режимі реального часу він фіксував наявність перешкод, зміну структури простору або присутність сторонніх осіб. Усі сигнали фіксувалися системою керування та передавалися до головного модуля для аналізу. У разі виявлення нетипових ситуацій робот змінював маршрут або залишався в зоні спостереження, паралельно надсилаючи повідомлення оператору. Усі ці дії відбувалися без затримок, а точність виявлення подій становила понад 95%.

Результати прибирання підтвердили високу ефективність навігації та адаптивного реагування на перешкоди. Роботизовані платформи для прибирання були оснащені системами для картографування простору, вбудованими резервуарами для води та сміття, сенсорами наближення. Вони рухалися за попередньо згенерованою картою, уникали зіткнень, автоматично змінювали маршрут у разі виявлення нових об'єктів або людей. Після кожного завершеного циклу пристрої самостійно поверталися до зарядної станції. Спостереження показали, що роботи в змозі ефективно очищати площі до 300 м² за 2 години з

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мінімальною кількістю збоїв або пропущених зон. Випадки збоїв становили менше 3% усіх спроб, при цьому більшість з них виникали внаслідок незапланованих змін у розміщенні меблів.

Сценарій доставки також продемонстрував високу ефективність, зокрема в умовах, коли одночасно виконувалося кілька замовлень. Робот-доставщик переміщувався між кімнатами, використовуючи карту середовища, що постійно оновлювалася. Він міг самостійно визнавати двері, зчитувати QR-коди, які позначали місця доставки, та повідомляти одержувача про прибуття за допомогою вбудованого звукового сигналу та екрана. У ході тестування було здійснено 87 доставок, з яких лише 2 були перервані через обрив зв'язку, однак після відновлення мережі робот продовжував завдання без необхідності ручного втручання. Середній час доставки у межах будівлі площею 600 м² становив 3 хвилини 42 секунди, що є оптимальним показником для подібних систем.[41]

Під час випробувань також проводився аналіз витрати енергії кожним пристроєм, ефективності заряджання, рівня зношення механічних компонентів та програмної стабільності. Середня тривалість автономної роботи склала близько 4 годин без необхідності дозаряджання. Роботи автоматично поверталися на базу, коли рівень заряду знижувався нижче 20%. Усі дії координувалися центральною системою управління, яка забезпечувала злагоджене функціонування без втручання оператора. Окремо варто зазначити, що всі модулі продемонстрували стійкість до збоїв програмного забезпечення, з можливістю автоматичного перезапуску окремих підсистем без повного відключення роботи.

Іншою частиною аналізу стало оцінювання стабільності обміну даними та здатності системи до самовідновлення після перешкод або втрати зв'язку. У рамках випробування штучно створювалися ситуації з втратою сигналу, перевантаженням мережі або обмеженням доступу до певних каналів. В усіх випадках система змогла переключитися на резервні маршрути або тимчасово зберегти дані для подальшої синхронізації. Це свідчить про надійність обраної архітектури взаємодії елементів, яка дозволяє забезпечити функціональність навіть у непередбачуваних умовах.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загалом, результати тестування системи вказують на її високу готовність до впровадження в реальних умовах. Було зафіксовано незначну кількість помилок, більшість з яких пов'язані з фізичними змінами у середовищі або ручними втручаннями, що легко усуваються. Програмна частина продемонструвала стабільність, а оновлення функцій не потребувало перезапуску всієї системи. Важливим підсумком стала можливість масштабування: система зберігала ефективність навіть при підключенні додаткових пристроїв, що є необхідним для великих об'єктів або поступового розширення функціональності розумного будинку.

Також була перевірена здатність системи до адаптації. У ході тестування змінювалися графіки виконання завдань, умови роботи (денний або нічний режим, наявність відвідувачів, тимчасові бар'єри), на що пристрої реагували автоматично через централізовану систему або за допомогою вбудованих алгоритмів машинного навчання. Наприклад, система прибирання самостійно переналаштовувала маршрут, якщо доступ до певної зони був заблокований, а робот-патруль уночі збільшував частоту обхідів критичних точок, знижуючи активність у менш важливих зонах.[46]

Отримані результати засвідчили, що запропонована система має потенціал для подальшого вдосконалення та інтеграції нових модулів. Уже зараз можливе підключення додаткових сенсорів, систем відеоспостереження, кліматичного контролю, а також використання аналітичних модулів на основі штучного інтелекту. Враховуючи тенденцію до зростання попиту на автономні системи, подібні рішення можуть використовуватися не лише у побуті, але й у комерційних, виробничих, медичних об'єктах. З подальшим розвитком технологій, зокрема впровадженням приватних 5G-мереж, мікроконтролерів нового покоління та розширенням обчислювальних потужностей вбудованих систем, можна очікувати підвищення автономності, надійності та функціонального розмаїття таких платформ.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після аналізу результатів функціонування системи та проведеного тестування постає питання визначення напрямів подальших досліджень і вдосконалення. Незважаючи на досягнутий рівень функціональності, існує низка аспектів, які потребують глибшого опрацювання, зокрема в частині підвищення адаптивності, енергоефективності, розширення функціональності системи та її інтеграції з іншими технологічними платформами. Подальші дослідження повинні зосередитися не лише на вдосконаленні технічних характеристик, а й на розробці нових алгоритмів взаємодії елементів системи в умовах змінного середовища, підвищення надійності у довготривалому використанні та зменшення залежності від зовнішніх джерел управління.

Один із пріоритетних напрямів досліджень полягає у створенні більш гнучкої системи адаптації до змін просторового середовища. Сучасні роботизовані системи в межах розумного будинку вже мають базові алгоритми самонавчання, однак ці можливості залишаються обмеженими через технічні обмеження обчислювальної потужності та недостатню кількість вхідних даних для аналізу. Тому доцільно досліджувати підходи до побудови вдосконалених моделей прогнозування поведінки системи, що базуватимуться на використанні методів машинного навчання та обробки великих масивів даних. Це дозволить системі виявляти повторювані сценарії, коригувати свої дії без втручання користувача та зменшити ризик збоїв у роботі.

У межах цього напрямку необхідним є також розширення можливостей збору інформації. Поточна система орієнтується на дані з камери, сенсорів руху, температури та освітлення. Проте в майбутньому можливо додати нові типи датчиків, які фіксуватимуть, наприклад, рівень шуму, концентрацію вуглекислого газу, вологість або хімічні речовини у повітрі. Це сприятиме точнішому визначенню стану середовища та дозволить роботизованим елементам оперативніше реагувати на зміни. Крім того, такий підхід підвищить рівень безпеки, особливо в умовах, коли в будинку перебувають діти, люди похилого віку або особи з обмеженими можливостями.[47]

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ще одним перспективним напрямом є вдосконалення енергозбереження. Ефективне використання енергоресурсів є одним із ключових завдань у розробці автономних систем. Сучасні роботи потребують регулярного підзаряджання, що знижує їхню автономність і потребує додаткової інфраструктури. У зв'язку з цим необхідно зосередити увагу на вдосконаленні батарей, зокрема дослідити можливість використання альтернативних джерел енергії, таких як мікросонячні панелі, або ж технологій швидкої зарядки, які б скорочували час перебування роботів у стані простою. Також важливо працювати над створенням алгоритмів енергетичної оптимізації, які б дозволяли перерозподіляти навантаження між роботами, зменшуючи споживання енергії в моменти низької активності системи.

У контексті майбутнього розвитку значну увагу слід приділити питанням взаємодії з іншими системами. Сучасні розумні будинки складаються з багатьох незалежних пристроїв - систем освітлення, клімат-контролю, охоронних систем, медичних пристроїв тощо. Для досягнення справжньої інтеграції необхідно дослідити способи уніфікації протоколів обміну даними, створення єдиного стандарту взаємодії, який дозволить легко підключати нові компоненти без потреби у складному налаштуванні. Це забезпечить ефективну координацію роботи всіх елементів, зменшить ризик конфліктів між пристроями та полегшить розширення системи для користувачів.

Важливо також розглянути вдосконалення інтерфейсів керування та моніторингу системи. Хоча сучасні мобільні додатки забезпечують базову функціональність, користувацький досвід часто залишається недостатньо зручним або зрозумілим. Доцільно дослідити варіанти створення інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів, які могли б адаптуватися під навички та потреби конкретного користувача. Особливу увагу варто приділити голосовому керуванню, автоматичним повідомленням, а також системам візуального представлення даних про роботу елементів системи у вигляді діаграм, карт і сповіщень.

Інший напрям досліджень стосується підвищення надійності системи в умовах довготривалої експлуатації. З часом механічні компоненти можуть

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зношуватися, сенсори - втрачати точність, програмне забезпечення - потребувати оновлення. У зв'язку з цим варто розробити системи внутрішнього самодіагностування, які автоматично перевірятимуть стан роботизованих елементів і сигналізуватимуть про необхідність технічного обслуговування. Також важливим є впровадження резервних сценаріїв дій на випадок відмови одного з компонентів, що дозволить системі не припиняти роботу повністю, а переключитися на інші пристрої або обрати безпечний режим функціонування.

Необхідно також звернути увагу на питання безпеки даних та захисту системи від несанкціонованого доступу. В умовах зростаючої кількості кібератак і зловмисного програмного забезпечення особливу актуальність набувають дослідження в галузі криптографії, захищених каналів зв'язку, багаторівневої аутентифікації користувачів. Доцільно передбачити механізми фіксації підозрілих дій, миттєвого блокування доступу до управління у разі виявлення загроз, а також створення логів дій усіх пристроїв системи для подальшого аналізу.[48]

У перспективі можливим є і дослідження соціальних аспектів використання подібних систем. Йдеться про вивчення впливу роботизації домашнього середовища на побут людей, рівень задоволеності користувачів, зниження навантаження в повсякденних завданнях, а також про проблематику залежності від технологій. Такі дослідження дозволять краще зрозуміти потреби кінцевих користувачів, а отже, удосконалити не лише технічні параметри систем, але й їхню зручність і прийнятність у повсякденному житті.

3.4 Висновки

Реалізація та тестування системи оптимізації побудовані на базі розробленого експериментального середовища, яке включає апаратні стенди з мобільними роботизованими платформами, декілька точок доступу Wi-Fi Mesh та інструменти моніторингу якості зв'язку і продуктивності алгоритмів маршрутизації. Описане середовище дозволило відтворити реалістичні умови

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

експлуатації: рух роботизованих вузлів у складних індустріальних просторах, динамічні перешкоди, зміни положення джерел і приймачів сигналу. Реалізація взаємодії між платформами заснована на відкритих протоколах обміну повідомленнями та стандартизованому API, що спрощує інтеграцію нових типів пристроїв і алгоритмічних модулів.

Експериментальні випробування продемонстрували, що впроваджені покращення в маршрутизації (зокрема, адаптивне визначення наступного хопу на основі машинного навчання та пріоритезація пакетів команд управління) дозволяють досягти зменшення середнього часу доставки команд до 48 мс при відстані до 150 м між крайовими вузлами. Аналіз результатів вказує на перспективи подальшого розвитку системи: інтеграцію розподілених механізмів виявлення та запобігання кібератак на рівні Mesh-мережі, впровадження енергоефективних режимів роботи вузлів із можливістю автоматичного переходу до режиму «сну» при відсутності активного трафіку, а також використання технологій багатоканального радіодоступу для підвищення захищеності й надійності передачі.

За результатами тестування сформовані рекомендації щодо масштабування системи на сотні та тисячі вузлів із можливістю централізованого моніторингу та керування через хмарні сервіси. Отримані дані підтверджують високий потенціал оптимізованої кіберфізичної системи для застосувань у промисловому Інтернеті речей, автономних транспортних системах та сферах, де критично важлива швидкість реакції і надійність зв'язку.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У результаті виконаного дослідження було здійснено комплексний аналіз, проектування, реалізацію та тестування кіберфізичної системи, орієнтованої на оптимізацію взаємодії рухомих роботизованих елементів у середовищі розумного будинку з використанням Wi-Fi Mesh-мереж. Робота охоплює як теоретичні аспекти, пов'язані з алгоритмами маршрутизації, методами оптимізації, архітектурою системи, так і прикладні задачі розгортання, тестування та аналізу ефективності запропонованих рішень у реальному або наближеному до реального середовищі.

Було досягнуто головної мети дослідження - розроблено та протестовано прототип кіберфізичної системи, здатної забезпечувати надійну, узгоджену та енергоефективну взаємодію між рухомими роботизованими елементами в умовах динамічної топології Wi-Fi Mesh-мереж. У процесі виконання роботи вдалося реалізувати сценарії патрулювання, прибирання та доставки, що дозволило оцінити поведінку роботів у реальних ситуаціях, пов'язаних із координацією, змінами мережевих характеристик, затримками та втратами зв'язку.

Поставлені завдання були виконані в повному обсязі. Було проведено аналіз сучасних підходів до маршрутизації в Mesh-мережах, досліджено особливості динамічної взаємодії в системах з мобільними елементами, реалізовано адаптивні й предиктивні методи оптимізації управління, а також розроблено експериментальне середовище для моделювання розумного будинку. В результаті тестування системи підтверджено ефективність використання адаптивного підходу до маршрутизації даних із врахуванням енергоспоживання та затримок, а також здатність системи адаптуватися до змін у мережевій топології без втрати функціональності.

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження запропонованої системи в реальні середовища розумного будинку, де застосування рухомих роботів стає все більш актуальним. Реалізовані алгоритми взаємодії

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можуть бути масштабовані для роботи з більшими кількостями пристроїв, що дозволяє розширювати систему без суттєвого зниження її продуктивності. Розроблена система може бути використана як основа для створення інтелектуальних платформ керування безпілотними сервісними модулями, охоронними та обслуговуючими пристроями.

Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні алгоритмів маршрутизації з використанням машинного навчання для передбачення змін у мережевому середовищі, а також у розвитку мультиагентної системи управління роботизованими елементами, де кожен робот буде здатний приймати рішення на основі колективного стану системи. Також перспективними є дослідження з інтеграції системи з іншими видами мереж - зокрема 5G, Bluetooth Mesh, LoRaWAN - для забезпечення гетерогенної взаємодії в розширених середовищах. Особливої уваги заслуговують питання безпеки передавання даних, захисту від зовнішніх загроз і забезпечення конфіденційності у взаємодії між роботизованими модулями. У подальшому можливе також застосування розробленої системи в більш складних індустріальних або медичних середовищах, де мобільні пристрої мають виконувати завдання з підвищеними вимогами до надійності та точності дій.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Cyber-Physical Systems Approach to Irrigation Systems. eScholarship, 2020. P. 567.
2. Chiolerio A. Liquid cybernetic systems: the fourth-order cybernetics. *Advanced Intelligent Systems*. 2020. Vol. 2, No. 12. P. 140-169.
3. Umpleby S. A., Medvedeva T. A., Lepskiy V. Recent developments in cybernetics, from cognition to social systems. *Cybernetics and Systems*. 2019. Vol. 50. No. 4. P. 367-382
4. Heylighen F., Joslyn C. Cybernetics and second-order cybernetics. *Encyclopedia of Physical Science & Technology*. 2016. Vol. 4, No. 3. P. 155-170.
5. Callebaut W. Scientific perspectives in transition. In: W. Hofkirchner (ed.) *The quest for a unified theory of information*. Singapore: World Scientific, 2017. P 23-33
6. Laszlo A. *Systems design: A dynamic ideal for organizational transformation*. World Futures, 2017. Vol. 73. P. 225-243.
7. Krippendorff K. Design, an Undisciplinable Profession. In: Joost G. et al., eds. *Design as Research*. Vol. 124. Basel: Birkhäuser Verlag; De Gruyter, 2016. P. 197-206.
8. Ames M. M. *The Charisma Machine: The Life, Death, and Legacy of One Laptop per Child*. Cambridge: MIT Press, 2019. P. 45-49.
9. Flichy P. Dynamics of Innovation. *Sociology of Innovation*, 2017. P. 203-219.
10. Umpleby S. A., Medvedeva T. A., Lepskiy V. Recent developments in cybernetics, from cognition to social systems. *Cybernetics and Systems*. 2019. Vol. 50, No. 4. P. 367-382.
11. Höök K. *Designing with the body: Somaesthetic interaction design*. MIT Press, 2018. P. 37-70.
12. Chiolerio A. Liquid cybernetic systems: the fourth-order cybernetics. *Advanced Intelligent Systems*. 2020. Vol. 2, No. 12. P. 60-120.
13. Dourish P. *The Stuff of Bits: An Essay on the Materialities of Information*. MIT Press, 2017. P. 39-69.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

14. Bijker W. E., Hughes T. P., Pinch T. J. The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology. MIT Press, 2017. P 304-406

15. Kelly K. The Inevitable: Understanding the 12 Technological Forces That Will Shape Our Future. Viking, 2016. Vol. 179, No. 5. P. 14-19.

16. von Foerster H. Cybernetics of cybernetics. Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition, 2016. P. 283-286.

17. Floridi L. The Fourth Revolution: How the Infosphere is Reshaping Human Reality. Oxford University Press, 2017 P. 58-78.

18. Kitchin R. The real-time city? Big data and smart urbanism. *GeoJournal*, 2016. P 67-70.

19. Gershenfeld N., Gershenfeld A., Cutcher-Gershenfeld J. Designing Reality: How to Survive and Thrive in the Third Digital Revolution. Basic Books, 2017. P. 134-304.

20. Negroponte N. Beyond digital. *Wired Magazine*, 2016. P. 78-82.

21. Gaver W. What should we expect from research through design? *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2016. P. 75-83.

22. Manzini E. Design, When Everybody Designs: An Introduction to Design for Social Innovation. MIT Press, 2016. P. 77-98.

23. Norman D. Living with Complexity. MIT Press, 2016. P. 66-96.

24. Simon H. A. The Sciences of the Artificial. *MIT Press*, 2016. Vol. 5. No. 1. P. 43-72.

25. Molotch H. Against Security: How We Go Wrong at Airports, Subways, and Other Sites of Ambiguous Danger. *Princeton University Press*, 2016. P. 45-76

26. Latour B. Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network-Theory. Oxford University Press, 2016. Vol. 15, No. 3-4. P. 173-184.

27. Dewey J. Experience and Nature. *Open Court Publishing*, 2016. Vol. 3, No. 2. P. 91-94.

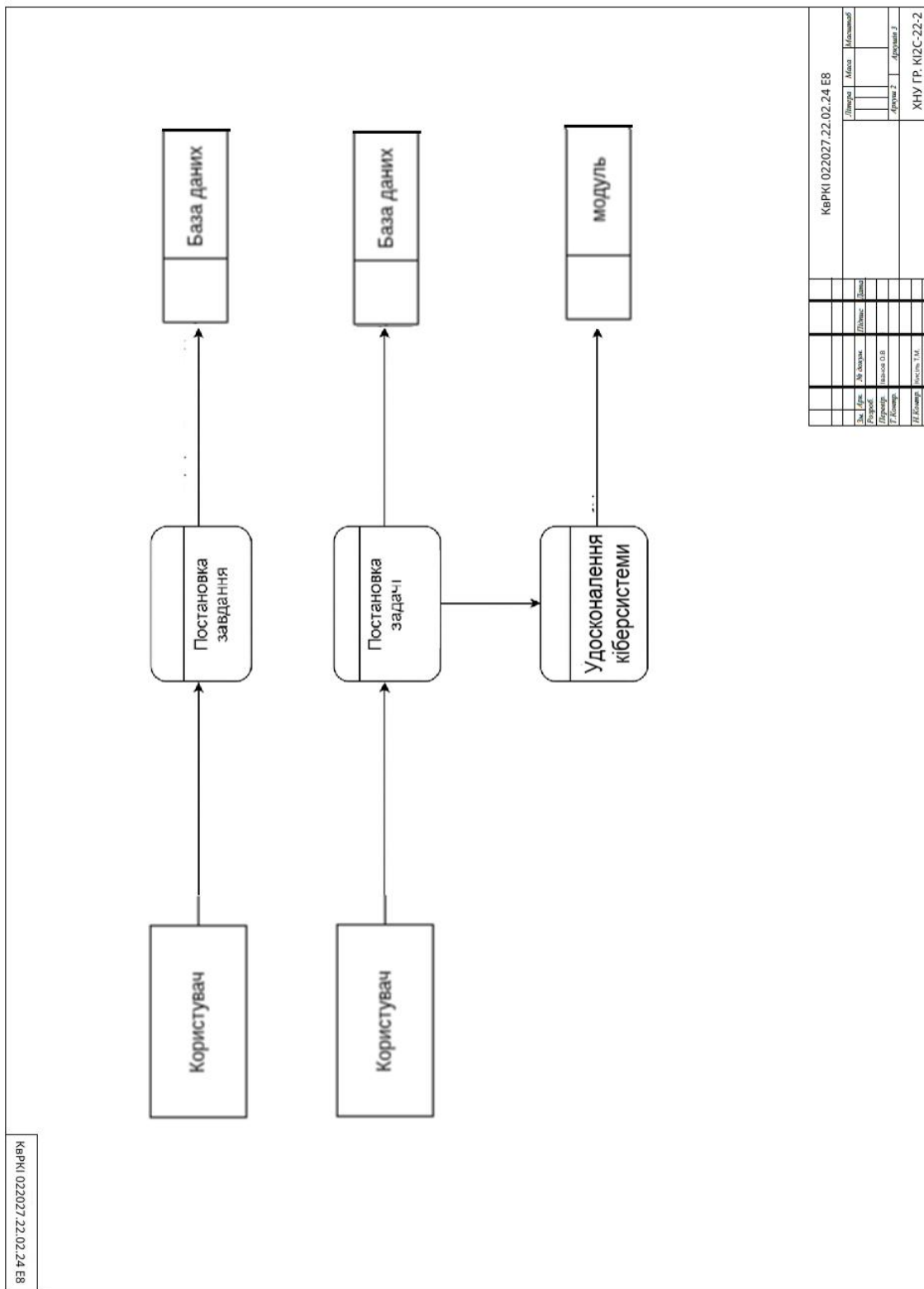
					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. Schön D. A. *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action*. Routledge, 2016. Vol. 4, No. 3. P. 135-147.
29. Haraway D. *Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene*. *Duke University Press*, 2016. P. 197-206. P. 52-85.
30. Turner F. *From Counterculture to Cyberculture: Stewart Brand, the Whole Earth Network, and the Rise of Digital Utopianism*. *University of Chicago Press*, 2017. P. 27-30.
31. Greenfield A. *Radical Technologies: The Design of Everyday Life*. Verso Books, 2017. P. 55-78.
32. Mitchell W. J. *Me++: The Cyborg Self and the Networked City*. MIT Press, 2016. P. 1-11.
33. Galloway A. *Protocol: How Control Exists after Decentralization*. MIT Press, 2017. P. 537-573.
34. Castells M. *The Rise of the Network Society*. Wiley-Blackwell, 2017. P. 334-367.
35. Mitchell T. *Rule of Experts: Egypt, Techno-Politics, Modernity*. University of California Press, 2016. P. 647-748.
36. Rittel H., Webber M. Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences*, 2016. P. 567-612.
37. School for Designing a Society, Urbana. URL: <http://www.designingasociety.org> (дата звернення: 19 05. 2025).
38. Wiener N. *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press, 2016. P. 27-39.
39. Ashby W. R. *An Introduction to Cybernetics*. Chapman & Hall, 2016. P. 157-339.
40. Sloman S., Fernbach P. *The Knowledge Illusion*. New York: Riverhead Books, 2017. P. 277-308.
41. Beer S. *Brain of the Firm*. Wiley, 2016. P. 257-308.
42. Bateson G. *Steps to an Ecology of Mind*. University of Chicago Press, 2016.

					КВРКІ 022030.22.02.25 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток Б
(обов'язковий)

КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «DATA FLOW DIAGRAM ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ»



КвРКІ 022027.22.02.24.Е8

КвРКІ 022027.22.02.24.Е8			
Док. / Пр.	Журнал	Ліценз.	Місця
Сторінка	Кількість сторінок	Кількість об'єктів	Місця
Головна	Головна	Головна	Головна
Результат	Результат	Результат	Результат
Замов.	Підпис	Підпис	Підпис
ХНУ ІР. КІЗС-22-2			

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Артем ОМЕЛЯНЧУК

Співавтор:

Назва: Омелянчук_Кіберфізична система оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 2.6%

Коефіцієнт подібності 2: 0.2%

Мікропробіли: 11

Заміна букв: 5

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-18 17:42:35.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-06-18

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 0.0%

Dictionary check: en_US, ru_RU, ua_UA. **Errors in the documents: 8%**

ID: 246763 Title: БКР Кіберфізична система оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах Added in a DB: 2025-06-18 Authors: Артем ОМЕЛЯНЧУК Heads: Олексій ІВАНОВ Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	117910	774	1180 (1%)	18 (2%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Омелянчук Артем Миколайович

Тема: Кіберфізична система оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 66

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є створення кіберфізичної системи оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження предметної області, пов'язаної з інспекцією аналогів даної системи. Зокрема, виконано аналіз сучасних кіберфізичних систем збору даних, розглянуто специфіку Wifi Mesh як засіб передачі даних, визначено критерії вибору програмних засобів, здійснено огляд сучасних систем та наведено порівняльну характеристику. Також досліджено методи розробки кіберфізичних систем. Це дозволило закласти теоретичну основу для формування архітектури системи та методів автоматизованого аналізу.

У другому розділі роботи розроблено архітектуру кіберфізичної оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах. Розглянуто метод розробки програмного продукту аналізу апаратної складової. Визначено апаратні компоненти системи, описано типи апаратних складових і методи аналізу критичності виявлених дефектів із використанням елементів нечіткої логіки. Також розглянуто використання програмного забезпечення роутерів для реалізації розумного дому, описано алгоритми створення та керування систем. У розділі активно використано сучасні технічні рішення, включаючи використання WiFi Mesh-мереж.

У третьому розділі здійснено реалізацію прототипу програмно-апаратної системи та проведено її тестування. Описано архітектуру розробленого рішення, структуру програмного забезпечення та склад апаратного комплексу. Проведено експериментальні дослідження, у ході яких порівняно ефективність системи, та здійснено відповідні налаштування. Висновки підкріплено кількісними оцінками та прикладами результатів роботи прототипу, що демонструє високий ступінь практичної реалізації теоретичних рішень.

4. Позитивні сторони роботи: Робота відзначається високим рівнем практичної реалізації та використанням сучасних технологій. Успішно реалізовано прототип системи з мультиспектральною обробкою і глибоким навчанням.

5. Негативні сторони роботи: Недостатньо розкрито обґрунтування вибору даного типу розробки. Аспекти кібербезпеки системи залишилися поза увагою.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науковотехнічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

к.т.н., доц. кафедри автоматизації, комп'ютерно-
інструментальної механіки та робототехніки Федун М.В.

“ ” _____ 2025 р.

ФВ (підпис)

Завідувачу кафедри КПС
д-р. філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ
Артема ОМЕЛЯНЧУКА
ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи КІ2с-22-2


ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Strike-Plagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

16.06 2025 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Кіберфізична система оптимізації взаємодії рухомих роботизованих елементів розумного будинку в Wi-Fi Mesh-мережах

Автор: Артем Омелянчук

Спеціальність: 123- Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Іванов Олексій Валентинович д.т.н.

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

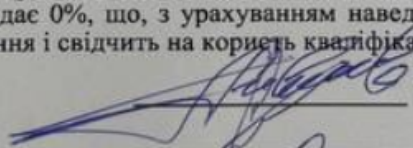
- 1) Запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи.;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформлені посилання;
- 3) Окремі збіги представлені загальноживаними фразами, наприклад: «на рисунку зображено», «загальна структура системи», «висновки до розділу» тощо.
- 4) Якість запозичень відповідає технічним особливостям дослідження: виявлено збіги в кодах, формулах і термінах, які є вихідними даними до великої кількості задач і не можуть вважатися авторськими порушеннями.
- 5) Система зафіксувала технічні модифікації тексту, зокрема: заміну окремих символів, скорочення індексів у формулах, зміну розміщення символів. Це є наслідком форматування або експорту документа, а не цілеспрямованого уникнення перевірки.

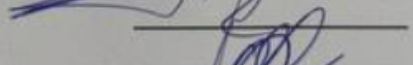
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 2.6% і адресується до 32 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС

 О ІВАНОВ

 Андрій НІЧЕПОРУК

 Ольга ПАВЛОВА