

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях

Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 302140.23.15.15 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, гр. КІ2с-23-1

Керівник

Науковий ступінь, учене звання

Нормоконтролер

Науковий ступінь, учене звання

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС

«11» червня 2026 р.

дата



Підпис

Ерік ТАРАСЮК

Ініціали, прізвище



Підпис

Юрій ВОЙЧУР

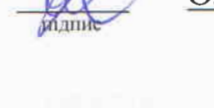
Ініціали, прізвище



Підпис

Сергій ЛИСЕНКО

Ініціали, прізвище



Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІІС

 Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Еріку Валерійовичу Тарасюку

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях

Керівник проекту (роботи) Войчур Юрій Олексійович, доктор філософії

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

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Аналіз задачі пожежогасіння в тунелях

Проектування кіберфізичної системи

Програмно-апаратна реалізація кіберфізич

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

Схема структурна

Схема функційна

Схема електрична принципова

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання при

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Прим
1	Вибір напряму дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	викон
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	викон
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2026	викон
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проектування системи адаптивного застосування моніторингових елементів розвідувального БПЛА	01.04.2026	викон
5	Робота над розділом 3 – проектування системи адаптивного застосування моніторингових елементів розвідувального БПЛА	29.04.2026	викон
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	викон
7	Попередній захист ВКР	26.05.2026	викон
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач


Підпис

Ерік ТАРАСЮК





Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Юрій ВОЙЧУР

Імя, ПРІЗВИЩЕ

№	Ф о р м а т	Позначення	Найменування	К і л · л и с т і в	№ ек з	П р и м і т к а															
			<u>Текстові документи</u>																		
1		КВРКІ 302140.23.15.15 Е8	Пояснювальна записка	65																	
			<u>Графічні матеріали</u>																		
2		КВРКІ 302140.23.15.15 Е8	Схема структурна	1																	
3		КВРКІ 302140.23.15.15 Е8	Схема функційна	1																	
4		КВРКІ 302140.23.15.15 Е8	Схема електрична принципова	1																	
КВРКІ 302140.23.15.15 ВП																					
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	<table border="1"> <tr> <td colspan="3" rowspan="2" style="text-align: center;">Відомість проекту</td> <td>Літера</td> <td>Аркуш</td> <td>Аркушів</td> </tr> <tr> <td>У</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">ХНУ, КІ2с-23-1</td> </tr> </table>		Відомість проекту			Літера	Аркуш	Аркушів	У	1	1	ХНУ, КІ2с-23-1					
Відомість проекту			Літера	Аркуш						Аркушів											
			У	1			1														
ХНУ, КІ2с-23-1																					
Розробив		Тарасюк		30.06																	
Перевір.		Войчур		30.06																	
Н. конпр.		Лисенко		29.06																	
Затв.		Павлова		01.06																	

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях».

Автор роботи: Ерік ТАРАСЮК.

Керівник роботи: Юрій ВОЙЧУР.

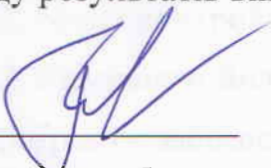
Пояснювальна записка: 65 с., 5 рис., 1 табл., 3 дод., 50 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

АРХІТЕКТУРА, БАЗА ДАНИХ, ДАВАЧ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню програмно-апаратної системи моніторингу пожежогасінню в тунелях.

Метою роботи є проектування, реалізація та тестування апаратно-програмного комплексу для збору, передавання, оброблення й візуалізації даних з давачів у реальному часі. Для досягнення поставленої мети було виконано аналіз сучасних підходів до побудови систем моніторингу, обрано елементну базу, розроблено структурну та функціональну схеми пристрою, спроектовано програмне забезпечення мікроконтролера і користувацький інтерфейс для перегляду результатів вимірювань.



Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Вступ	4
1 2 Теоретичні основи досліджуваної задачі	6
1.1 Аналіз задачі пожежогасіння в тунелях	6
1.2 Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях	8
1.3 Постановка задачі	13
2 Проектування кіберфізичної системи пожежогасіння в тунелях	14
2.1 Загальна архітектура системи та обґрунтування вибору компонентів	14
2.2 Апаратні компоненти сенсорної підсистеми	16
2.2.1 Тепловізійні камери (інфрачервоні сенсори)	16
2.2.2 Газоаналізатори	18
2.2.3. Давачі повітряного потоку	21
2.2.4 Додаткові сенсори	22
2.3 Апаратні компоненти виконавчої підсистеми	24
2.3.1 Роботизовані водяні гармати (монітори)	24
2.3.2 Система подачі вогнегасної речовини	26
2.3.3. Енкодери та давачі зворотного зв'язку для гармат	27
2.4.1. Центральний контролер	28
2.4.2. Мікроконтролери локального рівня	30
2.4.3. Комунікаційна інфраструктура	32
2.5. Програмне забезпечення та середовища розробки	34
2.6. Джерело живлення та захист обладнання	36
2.7. Висновки до розділу 2	37
3 Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи кіберфізичної системи пожежогасіння в тунелях	38
3.1 Розробка структурної схеми системи	38

КвРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ

Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата
Виконав		Ерік ТАРАСЮК		29.08
Перевір.		Юрій ВОЙЧУР		29.08
Н.контр.		Сергій ЛИСЕНКО		
Ватрен.		Ольга ПАВЛОВА		01.09

Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях.
Пояснювальна записка

Літера	Арк.вс.	Арк.впів.
у	2	65

ХНУ КІ2с-23-1

3.2. Розробка функціональної схеми	44
3.3. Розробка принципових електричних схем	49
3.4. Програмна реалізація	61
3.8. Висновки до розділу 3	68
Висновки	69
Перелік джерел посилань	70
Додаток А Копія креслення «Схема структурна».....	76
Додаток Б Копія креслення «Схема функційна»	77
Додаток В Копія креслення «Схема електрична принципова»	78
Додаток Г Фрагмент основного циклу сенсорного вузла (C++)	79

ВСТУП

Забезпечення пожежної безпеки в тунелях є одним із найскладніших завдань сучасної інфраструктури. Обмежений простір, висока швидкість поширення вогню та утруднений доступ рятувальних служб роблять будь-яке займання потенційно катастрофічним. Традиційні системи пожежної сигналізації, що базуються на лінійних теплових детекторах або димових давачах, мають значну інерційність, що призводить до критичної втрати часу [1, 2].

Розвиток кіберфізичних систем відкриває шлях до створення інтелектуальних комплексів, здатних не лише виявляти загрозу за лічені частки секунди, а й здійснювати прецизійний фізичний вплив на осередок займання без участі людини [3].

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого виявлення та локалізації пожежі в умовах тунельних споруд.

Предмет дослідження – кіберфізична система, що інтегрує мережу тепловізійного моніторингу, газоаналізатори та роботизовані лафетні стволи (водяні гармати) з інтелектуальним керуванням.

Мета роботи – мінімізувати час реакції на виникнення вогню та забезпечити точне наведення засобів пожежогасіння з урахуванням динамічних факторів середовища (повітряних потоків).

Ключові особливості пропонованої системи:

- мультисенсорна конвергенція – поєднання даних з тепловізорів (візуалізація температурних градієнтів) та газоаналізаторів (виявлення продуктів згоряння на молекулярному рівні);
- швидкодія – ідентифікація аномалії до моменту спрацювання порогових температурних давачів;

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 4
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

– адаптивність – розрахунок траєкторії струменя води або піни в реальному часі з урахуванням вектора швидкості повітря, що створюється вентиляційними системами тунелю;

– автономність – здатність системи самостійно приймати рішення про локалізацію вогню в умовах нульової видимості через задимлення.

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

1 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ЗАДАЧІ

1.1 Аналіз задачі пожежогасіння в тунелях

Основною складністю пожежогасіння в тунелях є обмежений об'єм, який сприяє надзвичайно швидкому накопиченню тепла та продуктів згоряння. Горизонтальна спрямованість об'єкта створює умови для інтенсивного поширення диму вздовж склепіння, що не тільки перекриває видимість для евакуації, а й створює небезпечний тепловий потік, який може пошкодити конструкції тунелю на значній відстані від вогнища [4].

На відміну від відкритих майданчиків, у тунелі температура підіймається за експонентою. Вже за перші 3-5 хвилин вона може перевищити 1000°C , що призводить до термічного руйнування бетону (спікання та відшаровування). Це вимагає від системи пожежогасіння реакції в інтервалі «золотої хвилини» – до того, як пожежа перейде у фазу неконтрольованого розвитку [5, 6].

Вентиляційні системи тунелів створюють потужні повітряні потоки, які безпосередньо впливають на вектор розповсюдження полум'я та диму. Для автоматизованої системи це становить серйозну математичну проблему – траєкторія струменя вогнегасної речовини (води чи піни) буде відхилятися під дією вітру, що вимагає динамічного коригування кута наведення гармат у реальному часі [7].

Традиційні оптичні камери стають марними вже за кілька секунд після початку загоряння через щільну завісу диму. Аналіз показує, що лише використання тепловізійних сенсорів далекого інфрачервоного діапазону дозволяє «бачити» крізь дим і точно визначати координати епіцентру (Hot Spot), ігноруючи візуальні перешкоди [8].

У тунелях постійно присутні джерела інтенсивного тепла, які не є вогнищами (пожежами), – розігріті двигуни вантажівок, вихлопні системи та гальмівні диски. Кіберфізична система повинна володіти інтелектуальними алгоритмами, щоб відрізнити технічне тепло транспортного засобу від

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аномального тепловиділення, спричиненого розливом палива або займанням вантажу [9].

Часто пожежі передують процес тління або витоку піролізних газів. Аналіз задачі показує, що інтеграція газоаналізаторів, налаштованих на CO та NO₂, дозволяє виявити загрозу ще до появи відкритого полум'я. Поєднання даних про концентрацію газів із тепловізійною картою дозволяє системі підготувати роботизовані установки до атаки заздалегідь [10, 11].

Масове заливання тунелю водою (спрінклерні системи) може призвести до коротких замикань електромереж та пошкодження автомобілів, які не охоплені вогнем. Завданням роботизованих гармат є «хірургічна» точність – подача вогнегасної речовини виключно в зону займання, що мінімізує побічні збитки та полегшує подальше відновлення руху [12].

Оскільки відстань від роботизованої установки до цілі може сягати десятків метрів, необхідно враховувати гравітаційні сили та опір повітря. Кіберфізична система має обчислювати точку падіння струменя, використовуючи дані про тиск у магістралі та поточну швидкість повітряного потоку, що вимірюється анемометрами [13].

Залізобетонні та металеві конструкції тунелів створюють складні умови для поширення радіосигналу. Аналіз підтверджує необхідність створення дротової резервної мережі передачі даних між сенсорами та виконавчими механізмами (роботами), щоб гарантувати працездатність системи навіть при частковому руйнуванні інфраструктури [14, 15].

Окрім безпосереднього гасіння, система має виконувати роль навігатора. Роботизовані установки можуть використовуватись для створення «водяних завіс», які знижують температуру на шляхах евакуації людей, захищаючи їх від теплового випромінювання, поки пожежні розрахунки прибувають на місце події [16].

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях

Обґрунтування актуальності розробки кіберфізичної системи пожежогасіння в тунелях базується на критичній уразливості сучасної транспортної інфраструктури перед загрозою термічного руйнування. У тунелях традиційні методи детекції, такі як лінійні теплові кабелі або димові сповіщувачі, часто спрацьовують із затримкою у кілька хвилин, оскільки вони очікують фізичного контакту з конвекційним потоком гарячих газів під стелею. Проте за цей час пожежа в обмеженому просторі встигає перейти у фазу інтенсивного горіння, створюючи умови, за яких евакуація стає неможливою, а гасіння стандартними засобами – неефективним [17-19].

Впровадження мережі тепловізорів та газоаналізаторів трансформує концепцію безпеки від пасивного очікування до проактивного моніторингу, оскільки ці сенсори здатні зафіксувати аномальне випромінювання та хімічні зміни складу повітря ще до появи видимого полум'я. Кіберфізична інтеграція дозволяє системі не просто ідентифікувати загрозу, а миттєво локалізувати координати вогнища в тривимірному просторі. Це критично важливо для тунелів, де через обмежену видимість та ризик обвалу людський фактор при первинній розвідці пожежі має бути мінімізований для збереження життів рятувальників.

Особливого значення набуває здатність системи фізично взаємодіяти з динамічним середовищем за допомогою роботизованих водяних гармат. На відміну від дренчерних систем, які заливають величезні площі, що призводить до паніки серед водіїв та затоплення шляхів евакуації, роботизована система діє прецизійно. Вона враховує аеродинамічні характеристики тунелю, зокрема потужні повітряні потоки від вентиляції, які зазвичай зносять струмінь води. Автоматичне коригування кута атаки дозволяє доставити вогнегасну речовину безпосередньо в епіцентр займання з максимальною енергією удару [20-21].

Крім того, актуальність такої системи підкріплюється економічним аспектом збереження капітальної споруди. Тривалий вплив високих температур

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у тунелі призводить до деградації арматури та вибухового відколювання бетону, що може вивести стратегічний об'єкт з експлуатації на місяці або роки. Швидке пригнічення вогню на стадії займання дозволяє зберегти цілісність конструкції та мінімізувати збитки від простою транспортних артерій. Таким чином, перехід до інтелектуальних кіберфізичних комплексів є єдиним надійним способом гарантування безпеки в умовах зростаючої інтенсивності дорожнього руху.

Архітектура кіберфізичної системи пожежогасіння в тунелях базується на принципі багаторівневої інтеграції сенсорних мереж та виконавчих механізмів, що працюють у єдиному інформаційному полі. На нижньому рівні розташовується розгалужена мережа вузлів, кожен з яких містить тепловізійну камеру високої роздільної здатності та набір газоаналізаторів. Ці вузли монтуються вздовж склепіння тунелю з певним кроком, що забезпечує повне перекриття зон спостереження та дозволяє здійснювати триангуляцію джерела тепла з декількох точок одночасно. Таке просторове розміщення гарантує, що навіть за умови часткового перекриття огляду габаритним транспортом, система збереже візуальний контакт із осередком займання [22-24].

Центральною ланкою архітектури є промисловий сервер обробки даних, який виконує роль «цифрового мозку» системи. Він збирає потокову інформацію від інфрачервоних сенсорів та аналізує динаміку зміни газового складу повітря в реальному часі. Використання спеціалізованих алгоритмів дозволяє серверу миттєво відрізнити нормальні теплові сигнатури автомобілів від аномальних температурних сплесків. Завдяки високій обчислювальній потужності система формує динамічну тривимірну модель внутрішнього простору тунелю, де кожне потенційне вогнище отримує точні координати в системі XYZ.

Важливим компонентом архітектури є інтеграція з анемометричними давачами, що вимірюють швидкість та напрямок повітряних потоків, створюваних вентиляцією. Ці дані передаються на рівень керування водяними гарматами як критичні поправки для балістичного розрахунку. Оскільки повітря в тунелі постійно перебуває в русі, траєкторія струменя води не є статичною

					КвРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 9
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

дугою, а вимагає безперервного коригування в залежності від турбулентності навколишнього середовища. Архітектура передбачає замкнений цикл зворотного зв'язку, де тепловізор постійно моніторить точку падіння води та подає сигнал на мікрокоригування позиції гармати.

Виконавчий рівень представлений роботизованими лафетними стволами, які мають три ступені свободи та здатні обертатися з високою кутовою швидкістю. Кожен робот оснащений власним локальним контролером, який отримує команди від центрального сервера через промислову шину даних типу EtherCAT або Profinet. Це забезпечує мінімальну затримку передачі сигналу, що вимірюється мілісекундами, дозволяючи системі реагувати на спалах практично миттєво. Гідравлічна частина архітектури включає мережу трубопроводів з автоматичними клапанами, які подають тиск лише до тієї гармати, що знаходиться в зоні прямої видимості вогню [25-28].

Для забезпечення живучості системи архітектура реалізується за принципом децентралізації та надмірності. Кожен сегмент тунелю обслуговується незалежним кластером обладнання, який може продовжувати функціонувати навіть у разі обриву зв'язку з центральним диспетчерським пунктом. Програмне забезпечення вузлів дозволяє їм «спілкуватися» між собою, передаючи інформацію про поширення вогню сусідам по мережі. Це створює ефект колективного інтелекту, де група роботів може координувати свої зусилля для створення потужного водяного бар'єра навколо зони аварії [29-33].

Інформаційний рівень архітектури також включає підсистему предиктивного аналізу, яка постійно порівнює поточні показники з історичними даними про пожежі. Це дозволяє системі передбачати ймовірний шлях поширення диму та завчасно готувати відповідні сектори пожежогасіння. Крім того, архітектура може бути інтегрована з системою керування дорожнім рухом, що дозволяє автоматично вмикати червоні сигнали світлофорів на в'їздах до тунелю при детекції перших ознак загрози. Такий комплексний підхід зробить

систему не просто інструментом гасіння, а глобальним регулятором безпеки [34-37].

Окремим рівнем архітектури виступає інтерфейс взаємодії з оператором, який дозволяє людині за необхідності перехопити керування будь-якою гарматою дистанційно. Відеопотік з тепловізорів транслюється на пульт моніторингу в режимі реального часу з накладеною телеметрією про температуру та концентрацію газів. Це забезпечує повну обізнаність персоналу про ситуацію навіть за умови нульової видимості в оптичному діапазоні. При цьому автоматика продовжує розраховувати балістичні правки, допомагаючи оператору точно вражати ціль у напівавтоматичному режимі [38-41].

Енергетична підсистема архітектури проектується за стандартами найвищої категорії надійності з використанням джерел безперебійного живлення та вогнестійких кабельних ліній. Кожен робот та сенсорний вузол захищені спеціальними кожухами з активним охолодженням, що дозволяє їм працювати в умовах екстремального теплового випромінювання протягом тривалого часу. Таким чином, фізична стійкість компонентів є невід'ємною частиною системної архітектури, гарантуючи виконання завдання навіть у центрі термічного пекла [42-45].

Програмна архітектура базується на модульному принципі, що дозволяє легко оновлювати алгоритми розпізнавання образів без заміни апаратного забезпечення. Використання контейнеризації для сервісів обробки даних забезпечує швидке масштабування системи при збільшенні довжини тунелю або додаванні нових типів сенсорів, наприклад, акустичних давачів вибуху. Це робить систему гнучкою та адаптивною до майбутніх технологічних стандартів «Розумного міста» [46-49].

Завершальним елементом архітектури є блок діагностики, який у фоновому режимі перевіряє цілісність форсунок, тиск у системі та чистоту лінз тепловізорів. У разі виявлення несправності система автоматично перерозподіляє зони відповідальності між сусідніми роботами, щоб нівелювати

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

виникнення «сліпих зон». Така висока ступінь самоорганізації є ключовою ознакою саме кіберфізичних систем, де віртуальна модель та фізична реальність злиті в єдиний стійкий механізм захисту.

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.3 Постановка задачі

Слід розв'язати наступну задачу: спроектувати та розробити кіберфізичну систему пожежогасіння в тунелях, яка передбачатиме виявлення джерела займання за частки секунди (до того, як спрацює звичайна сигналізація) і фізичне спрямування струменя води чи піни точно в епіцентр пожежі, враховуючи повітряні потоки.

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ В ТУНЕЛЯХ

2.1 Загальна архітектура системи та обґрунтування вибору компонентів

Проєктування кіберфізичної системи (КФС) пожежогасіння в тунелях вимагає системного підходу, що поєднує фізичні процеси (горіння, аеродинаміка, теплообмін) із цифровими обчислювальними ресурсами (збір і обробка даних, прийняття рішень, керування виконавчими механізмами) в єдиний замкнений контур реального часу. На відміну від традиційних систем пожежогасіння, які спрацьовують за фактом перевищення порогового значення одного параметра (наприклад, температури або задимленості) із затримкою від десятків секунд до кількох хвилин, кіберфізичний підхід дозволяє здійснювати багатопараметричний аналіз середовища та ініціювати адресне гасіння протягом часток секунди.

Архітектура розроблюваної системи побудована за трирівневим принципом, що забезпечує модульність, масштабованість та можливість незалежного вдосконалення кожного рівня. Першим є сенсорний рівень, який відповідає за безперервний моніторинг навколишнього середовища всередині тунелю. На цьому рівні розгорнуто мережу тепловізійних камер, газоаналізаторів, анемометрів та допоміжних давачів (температури, вологості, тиску). Ці пристрої формують потоки первинних даних, що характеризують теплове поле, хімічний склад повітря та аеродинамічну обстановку вздовж тунелю.

Другий рівень обробки та прийняття рішень являє собою обчислювальне ядро системи. Центральний контролер на базі Raspberry Pi 5 отримує дані від сенсорного рівня, виконує їх обробку (фільтрація, нормалізація, калібрування), здійснює детекцію вогню за допомогою згорткової нейронної мережі, виконує злиття даних від різних типів сенсорів для підтвердження факту займання,

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обчислює просторові координати епіцентру та розраховує корекцію траєкторії струменя з урахуванням повітряних потоків.

Третій рівень реалізує фізичне гасіння. Роботизовані водяні гармати (монітори) з двома ступенями свободи обертання отримують від обчислювального ядра координати наведення, позиціонують сопло та подають вогнегасну речовину (воду або піну) точно в зону горіння. Зворотний зв'язок від енкадерів та тепловізорів забезпечує корекцію в реальному часі.

Формулювання вимог до системи базується на специфіці тунельного середовища. По-перше, вимога швидкодії: від моменту появи теплової аномалії до початку подачі вогнегасної речовини має пройти не більше 1–2 секунд, що суттєво менше за час реакції традиційних спринклерних систем (30–60 секунд) або ручного реагування (хвилини). По-друге, вимога завадостійкості: електроніка має надійно функціонувати в умовах підвищеного запилення, вібрацій від транспорту, перепадів температури (-20°C до $+60^{\circ}\text{C}$ для відкритих тунелів), підвищеної вологості та агресивних хімічних сполук у повітрі. По-третє, вимога надійності передбачає резервування критичних компонентів: дублювання каналів зв'язку, перекриття зон спостереження сусідніх камер, наявність локальної автономної логіки на мікроконтролерах нижнього рівня, здатних ініціювати гасіння навіть у разі втрати зв'язку з центральним контролером. По-четверте, вимога масштабованості: архітектура повинна підтримувати тунелі довжиною від кількох сотень метрів до кількох кілометрів шляхом додавання нових сенсорних та виконавчих вузлів без перепроєктування ядра.

Обґрунтування кіберфізичного підходу порівняно з традиційними системами полягає в кількох ключових перевагах. Традиційні так звані спринклерні системи активуються термоелементом (скляна колба або плавка вставка) при досягненні температури $68-93^{\circ}\text{C}$ безпосередньо біля голівки розпилювача, що потребує значного нагрівання навколишнього повітря і, відповідно, часу. Крім того, спринклери заливають водою велику площу без

урахування точного розташування вогнища, що призводить до надмірного витрачання води та потенційного пошкодження інфраструктури. Кіберфізична система, навпаки, виявляє термічну аномалію на ранній стадії (підвищення температури на 5–10°C відносно фону), підтверджує загрозу даними газоаналізаторів, обчислює точні координати та спрямовує вогнегасну речовину адресно, мінімізуючи витрати ресурсів та побічні збитки.

2.2 Апаратні компоненти сенсорної підсистеми

Сенсорна підсистема є основою кіберфізичної системи пожежогасіння, оскільки саме від якості, швидкості та достовірності зібраних даних залежить ефективність усього ланцюга «виявлення – прийняття рішення – гасіння».

2.2.1 Тепловізійні камери

Тепловізійні камери виконують роль первинного джерела інформації про теплове поле всередині тунелю. На відміну від звичайних камер видимого спектру, тепловізори реєструють інфрачервоне випромінювання в діапазоні довгих хвиль (8–14 мкм), що дозволяє візуалізувати розподіл температури на поверхнях і в повітрі незалежно від рівня освітлення, наявності диму чи пилу. Це є критично важливою перевагою для тунельного середовища, де задимлення на початковій стадії пожежі може повністю блокувати видимість у оптичному діапазоні. Для реалізації прототипу системи було проведено порівняльний аналіз тепловізійних модулів, доступних для інтеграції у вбудовані системи. Основними кандидатами стали три модулі: FLIR Lepton 3.5, FLIR Boson 320 та Seek Thermal CompactPRO [13]. Кожен із них має свої переваги та обмеження, що визначають придатність для конкретного застосування.

Порівняльна характеристика тепловізійних модулів подана в Таблиці 2.1.

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 16
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика тепловізійних модулів

Характеристика	FLIR Lepton 3.5	FLIR Boson 320	Seek Thermal CompactPRO
Роздільна здатність	160×120 px	320×256 px	320×240 px
Спектральний діапазон	8–14 мкм	7,5–13,5 мкм	7,2–13 мкм
Частота кадрів	8,7 Гц (9 Гц)	до 60 Гц	15 Гц
Кут огляду (FoV)	57°	34°–92°	32°
Точність вимірювання	±5°C або 5%	±5°C або 5%	±5°C
Інтерфейс	SPI + I ² C	CMOS / USB	USB (micro)
Робоча температура	-10...+80°C	-40...+80°C	-10...+55°C
Орієнтовна вартість	~200 USD	~1000–1500 USD	~500 USD

Для реалізації прототипу обрано модуль FLIR Lepton 3.5 як оптимальний компроміс між вартістю, доступністю та функціональністю. Незважаючи на нижчу роздільну здатність (160×120 пікселів) порівняно з FLIR Boson (320×256), Lepton 3.5 забезпечує достатню деталізацію для виявлення теплових аномалій на відстані до 15–20 метрів, що відповідає типовій відстані між точками монтажу в тунелі. Ключовою перевагою Lepton 3.5 є наявність інтерфейсу SPI, що дозволяє безпосередньо підключити модуль до мікроконтролера або одноплатного комп'ютера без додаткових перетворювачів, а також порівняно низька вартість, що важливо при масштабуванні на довгий тунель.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Розрахунок необхідної кількості тепловізорів виконується на основі геометрії тунелю та кута огляду обраної камери. Для тунелю шириною W метрів та камери з горизонтальним кутом огляду α ефективна дальність покриття однією камерою вздовж осі тунелю визначається залежно від необхідної мінімальної роздільної здатності на цілі (кількості пікселів, що припадають на об'єкт розміром $0,3 \times 0,3$ м як типовий початковий осередок горіння). Для FLIR Lepton 3.5 із $FoV = 57^\circ$ та роздільною здатністю 160 пікселів по горизонталі ефективна зона покриття вздовж осі становить приблизно 15–18 метрів за умови монтажу на стелі тунелю на висоті 5–6 метрів.

Для забезпечення надійності та безперервності спостереження зони покриття сусідніх камер мають перекриватися не менш ніж на 20–30%. Таким чином, для тунелю довжиною L метрів кількість камер N розраховується за формулою: $N = L / (D \times 0,75)$, де D – ефективна дальність покриття однієї камери, а коефіцієнт 0,75 враховує зону перекриття 25%. Наприклад, для тунелю довжиною 500 метрів при $D = 16$ м потрібно щонайменше 42 камери. Перекриття зон є критично важливим також для стереоскопічного визначення координат осередку пожежі - це два суміжні тепловізори, спостерігаючи одну й ту саму зону під різними кутами, дозволяють методом тріангуляції обчислити тривимірні координати джерела тепла.

2.2.2 Газоаналізатори

Газоаналізатори виконують функцію хімічного підтвердження факту горіння та є другим незалежним каналом детекції пожежі. Будь-який процес горіння супроводжується виділенням характерних газоподібних продуктів: монооксиду вуглецю (CO), діоксиду вуглецю (CO_2), водню (H_2), вуглеводнів, а також утворенням аерозольних частинок (дим). Поєднання даних від тепловізорів (інформація про підвищення температури) та газоаналізаторів (інформація про хімічні ознаки горіння) суттєво зменшує ймовірність хибного

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спрацювання системи, оскільки кожне з цих джерел окремо може давати помилкові сигнали: тепловізор може реагувати на нагріту поверхню вихлопної труби транспортного засобу, а газоаналізатор на вихлопні гази дизельного двигуна.

Для виявлення продуктів горіння в системі використовується комбінація давачів кількох типів, що реалізує мультисенсорний підхід. Такий підхід дозволяє аналізувати не окремі концентрації газів, а їх характерні профілі, специфічні для процесу горіння різних матеріалів (бензин, дизель, гума, пластик, кабельна ізоляція тощо). Основні типи сенсорів, що використовуються в системі, описано нижче.

Напівпровідникові сенсори серії MQ є найбільш доступним та широко розповсюдженим типом газових давачів для прототипування. Принцип їх роботи базується на зміні електричного опору чутливого елемента (зазвичай оксид олова SnO₂) при адсорбції молекул цільового газу на його поверхні. У системі використовуються: MQ-2 – широкосмуговий давач горючих газів та диму (чутливий до LPG, пропану, метану, водню, диму), діапазон вимірювання 300–10000 ppm; MQ-7 – давач монооксиду вуглецю (CO), діапазон 20–2000 ppm, що є одним із найважливіших маркерів неповного згорання; MQ-135 – давач якості повітря, чутливий до NH₃, NO₂, бензолу, CO₂ та диму.

Характеристики газових сенсорів для прототипу системи подано в таблиці 2.2. Слід зазначити обмеження напівпровідникових сенсорів серії MQ: низька перехресна чутливість до кількох газів одночасно, необхідність попереднього прогрівання (до 48 годин для стабілізації показань), значний дрейф характеристик з часом, залежність від температури та вологості навколишнього середовища. Саме тому для підвищення достовірності результатів застосовується мультисенсорний підхід, де сигнали від кількох давачів різних типів аналізуються спільно.

Таблиця 2.2 — Характеристики газових сенсорів для прототипу системи

Модель	Цільовий газ	Діапазон, ppm	Час відгуку	Принцип дії
MQ-2	LPG, пропан, метан, H ₂ , дим	300–10 000	<10 с	Напівпровідниковий
MQ-7	чадний газ	20–2 000	<150 с*	Напівпровідниковий
MQ-135	NH ₃ , NO ₂ , бензол, CO ₂ , дим	10–1 000	<30 с	Напівпровідниковий
MH-Z19B	CO ₂	400–5 000	<120 с	інфрачервоний

Для підвищення точності вимірювання концентрації CO₂ до складу сенсорного вузла включено давач MH-Z19B, що працює за принципом недисперсійної інфрачервоної спектроскопії (NDIR). На відміну від напівпровідникових сенсорів, NDIR-давачі мають значно вищу селективність та стабільність показань, оскільки вимірюють поглинання інфрачервоного випромінювання на характерній довжині хвилі цільового газу (4,26 мкм для CO₂). MH-Z19B забезпечує діапазон вимірювання 400–5000 ppm із точністю ± 50 ppm та має вбудовану автоматичну калібрувальну функцію, що компенсує дрейф базової лінії. Зв'язок із мікроконтролером здійснюється по UART або PWM.

Мультисенсорний підхід реалізується на алгоритмічному рівні: сигнали від усіх газоаналізаторів у складі одного сенсорного вузла обробляються спільно. Формується вектор ознак концентрацій, який порівнюється з еталонними профілями горіння різних матеріалів. Для класифікації використовується зважене голосування або байєсівський класифікатор, що дозволяє розрізнити, наприклад, вихлопні гази двигуна (підвищення CO та NO₂ без значного зростання CO₂ та диму) від горіння палива (різке одночасне зростання CO, CO₂, диму).

2.2.3. Давачі повітряного потоку

Врахування аеродинаміки тунелю є однією з унікальних особливостей розроблюваної кіберфізичної системи, що відрізняє її від більшості існуючих систем автоматичного пожежогасіння. Повітряний потік усередині тунелю суттєво впливає як на розповсюдження полум'я та диму, так і на траєкторію руху струменя вогнегасної речовини від гармати до осередку горіння. Без урахування цього фактора точність наведення може зменшитися настільки, що струмінь не потрапить у ціль.

Повітряні потоки в тунелях формуються під дією кількох факторів: примусова вентиляція, природна тяга та поршневий ефект від руху транспортних засобів. Швидкість повітряного потоку може змінюватися від 0 до 10–12 м/с залежно від інтенсивності руху та режиму роботи вентиляції, а напрямок може змінюватися на протилежний протягом кількох хвилин.

Для вимірювання параметрів повітряного потоку обрано ультразвукові анемометри, які мають суттєві переваги перед механічними та термоанемометрами для даного застосування. Ультразвуковий анемометр вимірює швидкість повітря за різницею часу проходження ультразвукового сигналу в протилежних напрямках між парою перетворювачів. Перевагами цього типу є: відсутність рухомих частин, здатність вимірювати як швидкість, так і напрямок потоку, широкий діапазон вимірювання (від 0 до 60 м/с), висока частота зчитування (до 20 Гц), низький поріг чутливості (від 0,01 м/с).

Для прототипу системи розглянуто модуль Modern Device Wind Sensor Rev. P, термоанемометр на основі нагрівального елемента, простий у підключенні до мікроконтролера через аналоговий вихід, для визначення швидкості потоку, та промисловий 2D ультразвуковий анемометр Gill Instruments WindSonic або аналог для визначення швидкості та напрямку. Для прототипування також може бути використаний давач диференціального тиску

MPXV7002DP у поєднанні з трубкою Піто, що є найпростішим і найдешевшим рішенням для лабораторної моделі.

Анемометри розміщуються вздовж тунелю з кроком, що відповідає відстані між сенсорними вузлами (15–20 метрів). Кожен анемометр надає дані про локальну швидкість та напрямок повітряного потоку, що дозволяє обчислювальному ядру побудувати просторову карту повітряних потоків у реальному часі. Ця карта використовується для двох цілей: корекції траєкторії струменя вогнегасної речовини та прогнозування напрямку розповсюдження диму і полум'я для превентивного наведення сусідніх гармат.

2.2.4 Додаткові сенсори

Окрім основних детекторів до складу кожного сенсорного вузла включено допоміжні давачі, що забезпечують корекцію показань основних сенсорів та контроль працездатності виконавчих механізмів.

Для точного калібрування тепловізійних камер та газоаналізаторів необхідно знати поточну температуру повітря в зоні розташування сенсорного вузла. Для цього використовується цифровий давач вимірювання температури DS18B20 [50]), що забезпечує діапазон вимірювання від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$ із роздільною здатністю до $0,0625^{\circ}\text{C}$ (при 12-бітному режимі) та точністю $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ у діапазоні $-10\dots+85^{\circ}\text{C}$. Ключовою перевагою DS18B20 є використання однопровідного інтерфейсу 1-Wire, що дозволяє підключити кілька давачів до одного цифрового виводу мікроконтролера по одній шині, що спрощує монтаж.



Рисунок 2.1 – Давач вимірювання температури DS18B20

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вологість повітря суттєво впливає на показання напівпровідникових газових сенсорів: підвищена вологість змінює адсорбційні властивості чутливого шару SnO₂, що призводить до заниження або завищення концентрації газів. Для компенсації цього ефекту до сенсорного вузла включено комбінований давач температури та вологості DHT22 (AM2302), що забезпечує вимірювання відносної вологості в діапазоні 0–100% RH із точністю $\pm 2\%$ RH та температури в діапазоні $-40\dots+80^{\circ}\text{C}$ із точністю $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Зв'язок із мікроконтролером здійснюється по однопровідному цифровому протоколу. Для промислового впровадження рекомендовано використання сенсора Sensirion SHT31, який має значно вищу точність ($\pm 2\%$ RH), захищений фільтром від забруднень та підключається по інтерфейсу I²C.

Давачі тиску води в системі пожежогашіння. Для забезпечення зворотного зв'язку від виконавчої підсистеми та контролю працездатності системи водопостачання кожна водяна гармата обладнана давачом тиску на вхідному патрубку. Використовується аналоговий давач тиску з діапазоном 0–16 бар та виходом 0,5–4,5 В (наприклад, давач серії G1/4), що підключається до аналогового входу мікроконтролера. Показання тиску дозволяють: підтвердити наявність водопостачання перед активацією гармати, виявити аварійне падіння тиску, оптимізувати дальність струменя шляхом регулювання тиску.

Зведена таблиця допоміжних сенсорів представлена нижче (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Допоміжні сенсори сенсорного вузла

Давач	Параметр	Діапазон	Точність	Інтерфейс
DS18B20	Температура повітря	$-55\dots+125^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	1-Wire
MAX6675 + K	Температура (висока)	$0\dots+1300^{\circ}\text{C}$	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	SPI
DHT22	Вологість / темп.	0–100% RH	$\pm 2\%$ RH	1-Wire
G1/4 (0–16 бар)	Тиск води	0–16 бар	$\pm 1,5\%$	Аналоговий

Кожен сенсорний вузол, розташований вздовж тунелю з кроком 15–20 метрів, являє собою мультисенсорний модуль, що включає тепловізійну камеру, набір газоаналізаторів (MQ-2, MQ-7, MQ-135, MH-Z19B), анемометр та допоміжні давачі (DS18B20, DHT22, давач тиску). Усі сенсори підключені до локального мікроконтролера (ESP32 або STM32), який виконує первинну обробку та передає дані на центральний обчислювальний вузол.

2.3 Апаратні компоненти виконавчої підсистеми

Виконавча підсистема є фінальною ланкою кіберфізичного контуру, що перетворює результати обчислювального аналізу на фізичну дію, спрямовану подачу вогнегасної речовини в осередок займання. Від швидкодії, точності позиціонування та надійності виконавчих механізмів безпосередньо залежить ефективність гасіння. Підсистема складається з трьох функціональних блоків: роботизованих водяних гармат (моніторів) із сервоприводами, системи подачі вогнегасної речовини (насоси, клапани, трубопроводи) та давачів зворотного зв'язку (енкодери, кінцеві вимикачі).

2.3.1 Роботизовані водяні гармати (монітори)

Роботизована водяна гармата являє собою поворотну платформу з двома ступенями свободи, на якій закріплено сопло для розпилення або подачі прямого струменя вогнегасної речовини. Два ступеня свободи забезпечуються обертанням навколо вертикальної осі та нахилом відносно горизонтальної осі. Така конфігурація дозволяє спрямувати струмінь у будь-яку точку в межах робочої зони гармати, що визначається кутами обертання та дальністю струменя.

Конструктивно платформа виконана з нержавіючої сталі або алюмінієвого сплаву, що забезпечує стійкість до корозії в умовах підвищеної вологості тунелю та довготривалий контакт із водою. Платформа монтується на стелі або верхній

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

частині стіни тунелю на кронштейні, що дозволяє охопити максимальну площу. Сопло з'єднано з водопровідною магістраллю через гнучкий армований шланг високого тиску, що не перешкоджає обертанню платформи в межах робочих кутів. Для позиціонування платформи використовуються сервоприводи постійного струму з редуктором.

Таблиця 2.4 – Порівняльна характеристика сервоприводів для гармати

Характеристика	Dynamixel MX-64	NEMA 23 +	Промисловий
Обертальний момент	6,0 Н·м (12 В)	1,2–3,0 Н·м	10–50 Н·м
Швидкість обертання	78 об/хв	до 1000 об/хв	до 3000 об/хв
Точність позиціонування	0,088° (4096 позицій)	1,8° / 0,9° (мікрокрок до 0,05°)	< 0,01°
Зворотний зв'язок	Вбудований (позиція, температура, навантаження)	Зовнішній енкадер	Вбудований абсолютний
Інтерфейс керування	TTL / RS-485	STEP/DIR + Enable	EtherCAT / CAN
Протокол	Dynamixel Protocol 2.0	—	CiA 402 / Modbus
Орієнтовна вартість	~300 USD	~50–100 USD (комплект)	500–3000 USD

При виборі приводів ключовими критеріями є: обертальний момент (не менше 15–20 Н·м для утримання сопла під тиском води), швидкість обертання (не менше 60°/с для забезпечення наведення за 1–2 секунди на будь-яку точку в зоні покриття), точність позиціонування (не гірше 0,3° для забезпечення влучання струменя в ціль на відстані 10–15 м), наявність зворотного зв'язку по положенню (вбудований енкодер). Для прототипу системи обрано цифрові сервоприводи серії Dynamixel MX-64 [51], які широко використовуються в робототехніці завдяки поєднанню високих характеристик та зручності інтеграції. Для промислового впровадження розглядаються крокові двигуни серії NEMA 23 або NEMA 34 із зовнішніми драйверами та абсолютними енкодерами. Порівняльна характеристика сервоприводів для гармати подана в таблиці 2.4. Dynamixel MX-64 забезпечує діапазон обертання 360° у режимі безперервного обертання або обмежений діапазон 0–360° у позиційному режимі. Для тунельного застосування достатній робочий діапазон по горизонталі $\pm 90^\circ$ (180° загалом) та по вертикалі від -30° до $+15^\circ$ (45° загалом), що обумовлено монтажем на стелі з нахилом вниз.

2.3.2 Система подачі вогнегасної речовини

Система подачі вогнегасної речовини забезпечує транспортування води або водного розчину піноутворювача від джерела до роботизованих гармат під необхідним тиском. До складу системи входять: насосна станція, трубопровідна магістраль, електромагнітні клапани, вузол дозування піноутворювача та контрольно-вимірювальна апаратура.

Основним елементом є відцентровий насос з електродвигуном потужністю 3–7,5 кВт (залежно від довжини тунелю та кількості одночасно активних гармат), що забезпечує тиск 6–10 бар та витрату 200–600 л/хв. Для прототипу використовується мембранний насос 12 В постійного струму з максимальним тиском 8 бар та витратою до 10 л/хв (наприклад, насос серії Shurflo або аналог),

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

що достатньо для однієї гармати в лабораторних умовах. Насос обладнано частотним перетворювачем (інвертором), що дозволяє регулювати продуктивність залежно від кількості активних гармат та необхідного тиску.

Електромагнітні клапани встановлюються на вході кожної гармати та забезпечують миттєве (менше 0,1 с) відкриття подачі за командою від контролера. Використовуються нормально закриті (NC) клапани з робочим тиском до 16 бар та приєднувальним розміром 1/2" або 3/4". Напруга живлення котушки 24 В DC, що відповідає загальній напрузі живлення системи. Для забезпечення безпеки в нормальному стані клапани закриті, що виключає випадкову подачу води.

Вузол дозування піноутворювача реалізовано за схемою пропорційного дозатора, який автоматично підмішує піноутворювач (3% або 6% розчин) до потоку води при активації відповідного режиму. Перемикання між водою та піною здійснюється додатковим електромагнітним клапаном на лінії піноутворювача. Ємність резервуара піноутворювача розраховується на 10–15 хвилин безперервної роботи одночасно двох гармат.

На магістралі встановлено аналогові давачі тиску та витратоміри імпульсного типу. Дані від цих давачів дозволяють обчислювальному ядру: контролювати працездатність насоса та трубопроводів, виявляти витіки, адаптувати тиск для оптимальної дальності та конфігурації струменя.

2.3.3. Енкодери та давачі зворотного зв'язку для гармат

Точне наведення водяної гармати на осередок пожежі можливе лише за наявності надійного зворотного зв'язку по положенню. Хоча сервоприводи Dynamixel MX-64 мають вбудований магнітний енкодер, для промислового рішення та підвищення надійності передбачено додаткові зовнішні давачі зворотного зв'язку.

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Абсолютні енкодери встановлюються на кожній осі обертання паралельно з вбудованими давачами приводу. На відміну від інкрементальних енкодерів, абсолютні зберігають інформацію про поточне кутове положення навіть після вимкнення живлення, що виключає необхідність процедури пошуку початкового положення при кожному перезапуску системи. Для прототипу обрано магнітний абсолютний енкодер AS5600, що забезпечує 12-бітну роздільну здатність (4096 позицій, 0,088°), підключається по I²C або аналоговому виходу та має компактні розміри. Діапазон вимірювання 0–360°, максимальна швидкість зчитування до 2200 об/хв.

Кінцеві вимикачі встановлюються на крайніх допустимих положеннях кожної осі обертання та виконують функцію механічного захисту від виходу за межі робочої зони. Це запобігає пошкодженню гнучких шлангів, кабелів та самих приводів. Використовуються мікроперемикачі з важелем, підключені до цифрових входів мікроконтролера.

2.4. Апаратні компоненти підсистеми обробки даних

Підсистема обробки даних виконує збір, аналіз та інтерпретацію сенсорних даних, прийняття рішень та генерацію керуючих команд для виконавчих механізмів. Архітектура обробки побудована за дворівневим принципом: локальні мікроконтролери виконують збір та первинну обробку даних від сенсорів, а центральний обчислювальний вузол на базі Raspberry Pi 5 здійснює операції збору даних та координацію дій.

2.4.1 Центральний контролер

Центральний обчислювальний вузол виконує найбільш ресурсомісткі завдання системи: обробку термозображень від мережі тепловізорів, детекцію вогню, збір даних від різнотипних сенсорів, обчислення координат осередку та

генерацію тракторій наведення гармат. Ці задачі потребують значної обчислювальної потужності, особливо в частині паралельних обчислень на GPU/NPU для обробки зображень у реальному часі.

Порівняльна характеристика обчислювальних платформ подано в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Порівняльна характеристика обчислювальних платформ

Характеристика	Jetson Orin Nano	Jetson Xavier NX	Raspberry Pi 5	Siemens S7-1500
CPU	6-core Arm A78AE	6-core NVIDIA Carmel	4-core Arm Cortex-A76	Спеціалізований
GPU / NPU	1024-core Ampere, 40 TOPS	384-core Volta, 21 TOPS	VideoCore VII (немає CUDA)	—
RAM	8 GB LPDDR5	8 GB LPDDR4x	4/8 GB LPDDR4X	до 4 MB вбудовано
Інтерфейси	GbE, USB 3.2, CSI, SPI, I ² C, UART	GbE, USB 3.1, CSI, SPI, I ² C, UART	GbE, USB 3.0, CSI, SPI, I ² C	PROFINET, PROFIBUS, Ethernet
TensorRT / CUDA	Так	Так	Ні	Ні
Енергоспоживання	7–15 Вт	10–20 Вт	5–12 Вт	5–25 Вт
Робоча температура	–25...+80°C	–25...+80°C	0...+50°C	–20...+60°C
Вартість	~250 USD	~400 USD	~80 USD	1500–5000 USD

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

За результатами порівняльного аналізу обрано Raspberry PI5 як основний обчислювальний модуль системи. Ключові аргументи на користь цього вибору полягають у наступному. По-перше, продуктивність у задачах дозволяє виконувати детекцію вогню на термозображеннях із частотою 30–60 кадрів на секунду при використанні оптимізованої моделі YOLOv8-nano через TensorRT. По-друге, підтримка обробки зображень. По-третє, широкий набір інтерфейсів: Gigabit Ethernet для з'язку з мережею локальних вузлів, пряме підключення камер, взаємодія з периферією. По-четверте, розширений робочий діапазон температур ($-25\dots+80^{\circ}\text{C}$) відповідає умовам тунелю.



Рисунок 2.2 - Raspberry PI5 [52]

2.4.2 Мікроконтролери локального рівня

Мікроконтролери локального рівня виконують функції безпосереднього збору даних від сенсорів (аналогових і цифрових), первинної обробки сигналів (фільтрація, калібрування, перетворення в інженерні одиниці), передачі оброблених даних на центральний контролер та прийому і виконання команд керування сервоприводами, клапанами та іншими виконавчими пристроями. Кожен сенсорний/виконавчий вузол вздовж тунелю обладнується власним мікроконтролером, що забезпечує локальну автономність у випадку тимчасової

втрати зв'язку з центральним контролером вузол здатний самостійно виявити критичну загрозу та ініціювати аварійне гасіння.

Для вибору мікроконтролера проведено порівняння двох найбільш популярних платформ для IoT та вбудованих систем: ESP32 (Espressif Systems) та STM32 (STMicroelectronics). Для прототипу системи обрано ESP32-WROOM-32E як основний мікроконтролер локальних вузлів. Головним аргументом є наявність вбудованого Wi-Fi та Bluetooth, що спрощує побудову комунікаційної мережі на етапі прототипування без додаткових мережевих модулів. Два ядра дозволяють розділити задачі: одне ядро виконує опитування сенсорів та первинну обробку, друге — мережевий обмін із центральним контролером. Достатня кількість каналів АЦП (18 каналів) забезпечує підключення всіх аналогових датчиків сенсорного вузла. Підтримка CAN 2.0 дозволяє реалізувати надійний зв'язок із сервоприводами та іншими виконавчими пристроями.



Рисунок 2.3 - Мікроконтролер ESP32-WROOM-32E [52]

Для промислового впровадження рекомендовано використання STM32F4 або STM32H7 з додатковим Ethernet-модулем (наприклад, W5500 або LAN8720), оскільки STM32 має детермінований час виконання (відсутність ОС Wi-Fi стеку, що може вносити затримки), апаратний FPU для обчислень з плаваючою точкою,

більший набір таймерів для генерації PWM-сигналів та ширший робочий діапазон температур ($-40\dots+105^{\circ}\text{C}$ для промислових версій).

Таблиця 2.6 — Порівняльна характеристика мікроконтролерів

Характеристика	ESP32-WROOM-32E	STM32F407VGT6
Ядро / архітектура	Dual-core Xtensa LX6	ARM Cortex-M4F
Тактова частота	до 240 МГц	до 168 МГц
Flash / RAM	4 MB Flash, 520 KB SRAM	1 MB Flash, 192 KB SRAM
АЦП	2 × 12-біт SAR (18 каналів)	3 × 12-біт (24 канали)
Інтерфейси	SPI, I ² C, UART, I ² S, CAN 2.0	SPI, I ² C, USART, CAN 2.0, USB OTG
Бездротовий зв'язок	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2/BLE	— (зовнішній модуль)
Вартість модуля	~3–5 USD	~10–15 USD (Discovery Kit)

2.4.3 Комунікаційна інфраструктура

Комунікаційна інфраструктура забезпечує передачу даних між усіма компонентами кіберфізичної системи: від сенсорів до локальних мікроконтролерів, від мікроконтролерів до центрального обчислювального вузла, від центрального вузла до виконавчих механізмів, а також до зовнішніх систем моніторингу. Вибір протоколів та фізичних інтерфейсів визначається вимогами до пропускнуої здатності, латентності, завадостійкості та довжини ліній зв'язку.

Архітектура комунікацій побудована за ієрархічним принципом із чотирма рівнями, кожен із яких використовує оптимальний для своїх задач протокол.

Рівень 1 передбачає застосування сенсорів. На цьому рівні використовуються стандартні проводові інтерфейси: I²C для цифрових давачів (DHT22, AS5600, МН-Z19В), SPI для тепловізора FLIR Lepton 3.5, аналогові входи АЦП для давачів серії MQ та давача тиску, UART для зв'язку з модулями, що потребують послідовного інтерфейсу. Довжина ліній зв'язку на цьому рівні не перевищує 1–2 метрів, тому завадостійкість забезпечується стандартними засобами (правильна розводка, розв'язуючі конденсатори).

Рівень 2 передбачає застосування центрального контролера. Це найбільш критичний рівень комунікацій із точки зору завадостійкості та пропускну здатності, оскільки лінії зв'язку проходять вздовж тунелю на відстані до кількох кілометрів в умовах сильних електромагнітних завад від транспорту та силового обладнання. Основним протоколом обрано Ethernet (100BASE-TX) із промисловими комутаторами, стійкими до вібрацій та розширеного діапазону температур. Поверх Ethernet використовується протокол MQTT, оптимізований для IoT-пристроїв з обмеженими ресурсами. MQTT забезпечує асинхронний обмін за моделлю «видавець–підписник», що дозволяє центральному контролеру підписатися на потоки даних від усіх сенсорних вузлів одночасно. Якість обслуговування встановлюється на рівні 1 для сенсорних даних та QoS 2 для критичних команд керування.

Для прототипу на етапі розробки магістральний зв'язок реалізовано через Wi-Fi (ESP32 підключається до точки доступу, на якій працює MQTT-брокер Mosquitto). Це спрощує розгортання та налагодження, проте для промислового впровадження Wi-Fi не рекомендовано через нестабільність у витягнутих металевих конструкціях тунелів.

Як резервний канал передбачено використання шини RS-485, диференціальний послідовний інтерфейс, що забезпечує зв'язок на відстані до 1200 м при швидкості 115200 бод зі стійкістю до електромагнітних завад. RS-485

використовує протокол Modbus RTU і активується автоматично при втраті Ethernet-з'єднання.

Рівень 3 передбачає застосування виконавчих механізмів. Для зв'язку з сервоприводами Dynamixel використовується шина TTL або RS-485 із протоколом Dynamixel Protocol 2.0. Для керування електромагнітними клапанами та насосом використано прямий цифровий вихід мікроконтролера через силовий ключ (MOSFET або реле).

Рівень 4 передбачає застосування зовнішнього моніторингу. Центральний контролер підключено до мережі диспетчерського пункту тунелю через Ethernet. Дані передаються по MQTT або HTTP REST API на сервер SCADA-системи або веб-панель оператора. Для резервного каналу зв'язку із зовнішнім світом передбачено модуль LoRa, що забезпечує зв'язок на відстані до 10–15 км із мінімальним енергоспоживанням, але низькою пропускнуою здатністю (до 50 кбіт/с), достатньою для передачі аварійних сповіщень.

Топологія мережі вздовж тунелю побудована за схемою «лінійний ланцюг із зірками»: промисловий Ethernet-комутатор через кожні 100 м, до кожного комутатора підключено 5–7 локальних вузлів. Центральний контролер підключено до першого комутатора або до виділеного магістрального комутатора. Для тунелів довжиною понад 1 км рекомендовано використання оптоволоконних з'єднань між комутаторами для збільшення дальності та повної електричної ізоляції сегментів.

2.4 Програмне забезпечення та середовища розробки

Програмне забезпечення кіберфізичної системи передбачає генерацію низькорівневого коду прошивки мікроконтролерів до високорівневих алгоритмів обробки даних та веб-інтерфейсу системи. Для ефективної розробки, налагодження та підтримки такої складної системи необхідний набір

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спеціалізованих інструментів, бібліотек та фреймворків, що забезпечують продуктивну роботу на кожному рівні програмного стеку.

PlatformIO обрано як основне середовище розробки для мікроконтролерів ESP32 та STM32. PlatformIO є відкритою екосистемою для розробки вбудованих систем, що інтегрується у Visual Studio Code як розширення та забезпечує: підтримку понад 1500 плат розробки (включаючи ESP32 та STM32), автоматичне управління toolchain-ами та бібліотеками, інтегрований відлагоджувач через JTAG/SWD для STM32, систему модульного тестування. Порівняно з Arduino IDE, PlatformIO надає значно потужніші засоби для роботи з великими проектами: підтримку кількох середовищ збирання в одному проєкті, інтелектуальне автодоповнення коду, навігацію по визначеннях.

Visual Studio Code використовується як універсальне середовище розробки для всіх рівнів програмного стеку: Python-скрипти для обробки зображень, навчання та оптимізація нейромережі, ROS 2 вузли, C/C++ код для мікроконтролерів через розширення PlatformIO, веб-інтерфейс системи зпасобами HTML, JavaScript, CSS. VS Code забезпечує єдине робоче середовище з інтегрованим терміналом, системою контролю версій Git та можливістю віддаленого підключення до Jetson через SSH.

Fritzing – інструмент, зручний для створення наочних схем підключення на макетній платі, який використовується для документування прототипу.

OpenCV версії 4.x – основна бібліотека для обробки зображень тепловізора. OpenCV використовується для захоплення та декодування кадрів із тепловізора через інтерфейс SPI або CSI, попередньої обробки термограм для нормалізації, фільтрації шумів, зміни роздільної здатності, конвертації між кольорними просторами), виділення контурів, обчислення моментів та центроїдів для визначення координат теплового об'єкта.

PID-бібліотека використовується для реалізації PID-регулятора позиціонування сервоприводів водяної гармати. PID-регулятор забезпечує

плавне та точне наведення без перегулювання та коливань, що критично для точності потрапляння струменя в ціль.

Eclipse Paho MQTT Client – бібліотека клієнта протоколу MQTT для мови С для мікроконтролерів. Використовується для обміну телеметрією (сенсорні дані, стан виконавчих механізмів) та керуючими командами між рівнями системи. На стороні брокера використовується Eclipse Mosquitto, легкий відкритий MQTT-брокер, що працює на Jetson або окремому серверному вузлі.

2.5 Джерело живлення та захист обладнання

Надійне електроживлення та фізичний захист електронних компонентів є критичними аспектами для системи, що працює в безперервному режимі в агресивних умовах тунельного середовища. Відмова живлення або пошкодження електроніки може призвести до втрати функціональності системи саме в момент, коли вона найбільш необхідна під час пожежі.

Основне живлення системи здійснюється від промислової мережі змінного струму 380/220 В через блоки живлення з перетворенням у постійний струм 24 В DC, що є стандартною напругою для промислової автоматизації. Від шини 24 В DC живляться: мікроконтролери через лінійні стабілізатори або DC-DC перетворювачі 24→3,3/5 В, сервоприводи (Dynamixel MX-64 працює при 12 В, що забезпечується DC-DC перетворювачем 24→12 В).

Кожен обчислювальний вузол та кожна група з 3–5 локальних вузлів обладнані промисловим джерелом безперебійного живлення на базі літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) акумуляторів, що забезпечують автономну роботу протягом 15–30 хвилин після припинення подачі мережевого живлення. LiFePO₄ обрано за рахунок високої стабільності, тривалого терміну служби (понад 2000 циклів), негорючості (що критично для протипожежної системи) та широкого діапазону робочих температур (–20...+60°C).

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Усі електронні компоненти розміщуються в герметичних корпусах зі ступенем захисту не нижче IP65. Для виконавчих вузлів, що знаходяться в безпосередній близькості до водяних гармат, застосовуються корпуси IP67 (захист від короткочасного занурення у воду). Матеріал корпусів алюмінієвий сплав із порошковим покриттям або нержавіюча сталь для зон підвищеної корозійної активності. У середині корпусів передбачені DIN-рейки для монтажу модульних компонентів, кабельні вводи з ущільненням, охолодження за рахунок тепловідвідних радіаторів на зовнішній стінці.

2.6 Висновки до розділу 2

У другому розділі було детально розглянуто апаратне та програмне забезпечення, необхідне для реалізації кіберфізичної системи пожежогасіння в тунелях. Обґрунтовано тривірневу архітектуру системи та визначено вимоги до кожного рівня.

Для сенсорної підсистеми обрано тепловізійний модуль FLIR Lepton 3.5 (прототип), комплект газоаналізаторів, ультразвукові анемометри для вимірювання повітряних потоків, а також допоміжні датчі температури (DS18B20), вологості (DHT22) та тиску води.

Для виконавчої підсистеми обрано роботизовані водяні гармати на базі сервоприводів Dynamixel MX-64 з двома ступенями свободи, комбінованими соплами, електромагнітними клапанами та системою контролю тиску.

Обчислювальне ядро системи базується на Raspberry PI5, локальні вузли виконуються на мікроконтролерах ESP32-WROOM-32E. Комунікаційна інфраструктура побудована на Ethernet з протоколом MQTT та резервним каналом RS-485.

Програмний стек включає PlatformIO як середовище розробки, OpenCV для обробки зображень та висновою, MQTT для телеметрії.

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Усі обрані компоненти забезпечують виконання поставлених вимог:
швидкодія, завадостійкість, надійність та масштабованість.

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ В ТУНЕЛЯХ

3.1 Розробка структурної схеми системи

Структурна схема є вихідним документом проектування, що визначає склад системи, ієрархію її функціональних блоків та зв'язки між ними. Розробка структурної схеми кіберфізичної системи пожежогасіння виконана відповідно до трирівневої архітектури, обґрунтованої в розділі 2, та враховує специфіку розгортання обладнання вздовж протяжного тунельного простору.

Структурна схема системи включає п'ять основних функціональних блоків, з'єднаних інформаційними та силовими зв'язками, що утворюють замкнений контур керування реального часу. Логіка взаємодії блоків побудована за принципом послідовної обробки: потік фізичних величин, таких як температура, концентрація газів, швидкість повітря, перетворюється на цифрові дані, аналізується обчислювальним ядром і трансформується у фізичну дію, тобто спрямований струмінь вогнегасної речовини, після чого результат дії знову оцінюється сенсорами, і тоді цикл замикається.

Першим блоком є блок сенсорів, що об'єднує мережу тепловізійних камер FLIR Lepton 3.5, газоаналізаторів (MQ-2, MQ-7, MQ-135, MH-Z19B), ультразвукових анемометрів та допоміжних датчиків (DS18B20, DHT22, датчик тиску). Сенсори згруповані у сенсорні вузли, кожен з яких обслуговує ділянку тунелю довжиною 15–20 метрів. Тепловізори формують потік радіометричних кадрів (160×120 пікселів, 16 біт, ~8,7 кадрів/с), газоаналізатори, пропорційні концентрації газів, а анемометри формують дані про швидкість і напрямок повітряного потоку. Усі потоки даних від блоку сенсорів є односпрямованими від сенсорів до блоку попередньої обробки.

Другим блоком є блок попередньої обробки, реалізований на мікроконтролерах ESP32-WROOM-32E. Кожен мікроконтролер обслуговує один

сенсорний вузол і виконує: зчитування аналогових сигналів від газоаналізаторів через вбудований АЦП (12-біт, 18 каналів), прийом цифрових даних від тепловізора по інтерфейсу SPI та від датчиків температури/вологості по шинах 1-Wire та I²C, цифрову фільтрацію сигналів (медіанний фільтр, ковзне середнє) та нормалізацію, перетворення необроблених значень напруги в інженерні одиниці (ppm, °C, % RH, м/с) за допомогою калібрувальних характеристик, пакетування даних у формат JSON та їх публікацію на центральний контролер через протокол MQTT по Wi-Fi (для прототипу) або Ethernet (для промислового впровадження).

Блок попередньої обробки виконує також функцію локальної аварійної логіки. При виявленні критичних перевищень порогових значень, зокрема, температура перевищує 200°C або концентрація CO перевищує 500 ppm, тобто мікроконтролер здатний самостійно активувати найближчу водяну гармату без очікування команди від центрального контролера. Ця функція забезпечує резервний рівень безпеки у випадку тимчасової втрати зв'язку з обчислювальним ядром.

Третім блоком є блок прийняття рішень, реалізований на одноплатному комп'ютері Raspberry Pi 5. Цей блок є центральним інтелектуальним елементом системи та виконує ресурсомісткі обчислення: висновок моделі детекції вогню (полегшена версія YOLOv8-nano, конвертована в ONNX та оптимізована під CPU) для класифікації термозображень, фузію (злиття) даних від тепловізорів та газоаналізаторів за методом Демпстера-Шефера для підтвердження факту пожежі та зменшення хибних спрацювань, триангуляцію координат осередку горіння на основі даних від кількох суміжних тепловізорів, побудову карти повітряних потоків на основі даних анемометрів та розрахунок балістичної корекції траєкторії струменя, генерацію команд наведення (кути pan/tilt, режим сопла) для виконавчих механізмів.

Raspberry Pi 5 отримує оброблені дані від усіх мікроконтролерів ESP32 по Wi-Fi через MQTT-брокер Mosquitto, що працює безпосередньо на Raspberry Pi.

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Чотириядерний процесор ARM Cortex-A76 з тактовою частотою 2,4 ГГц та 8 ГБ оперативної пам'яті LPDDR4X забезпечують достатню продуктивність для висновокую полегшеної нейронної мережі (час висновокую $\sim 80\text{--}120$ мс на CPU з використанням ONNX Runtime) та одночасного виконання всіх обчислювальних задач системи. Хоча Raspberry Pi 5 не має виділеного GPU з підтримкою CUDA, для даного застосування прийнятний час висновокую досягається оптимізацією моделі (квантизація INT8, зменшення вхідної роздільної здатності до 320×320) та використанням бібліотеки ONNX Runtime з підтримкою NEON-інструкцій процесора ARM.

Четвертим блоком є блок керування виконавчими механізмами, реалізований на окремих мікроконтролерах ESP32, що обслуговують роботизовані водяні гармати. Кожен мікроконтролер виконавчого вузла приймає від Raspberry Pi 5 команди наведення цільові кути повороту гармати та обраний режим сопла (струмінь, розпилення або піна). Мікроконтролер реалізує PID-регулятор для плавного та точного позиціонування сервоприводів Dynamixel MX-64, безперервно зчитує показання абсолютних енкодерів AS5600 для забезпечення зворотного зв'язку по положенню та керує електромагнітними клапанами подачі води та піноутворювача. Зв'язок між блоком прийняття рішень та блоком керування є двоспрямованим: Raspberry Pi 5 надсилає команди наведення, а мікроконтролер повертає телеметрію, тобто поточне положення гармати (кути), стан клапанів (відкрито/закрито), тиск води на вході.

П'ятим блоком є блок подачі вогнегасної речовини, що включає насосну станцію (відцентровий насос або мембранний насос для прототипу), трубопровідну магістраль високого тиску, нормально закриті електромагнітні клапани на вході кожної гармати, вузол пропорційного дозування піноутворювача та комбіновані сопла. Цей блок є переважно фізичним — його електронні компоненти (клапани, датчики тиску, витратоміри) керуються мікроконтролерами виконавчих вузлів.

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Зв'язки між функціональними блоками реалізовані через наступні інтерфейси та протоколи. Між блоком сенсорів та блоком попередньої обробки (ESP32): тепловізор підключається по SPI (SCK, MISO, MOSI, CS), конфігурація тепловізора по I²C (SDA, SCL); газоаналізатори MQ-2, MQ-7, MQ-135 аналогові виходи до каналів ADC1 мікроконтролера; MH-Z19B по UART (TX, RX); DS18B20 по шині 1-Wire; DHT22 по однопровідному цифровому протоколу; анемометр аналоговий вихід через дільник напруги до АЦП. Між блоком попередньої обробки та блоком прийняття рішень (Raspberry Pi 5): Wi-Fi 802.11n з протоколом MQTT (для прототипу) або Ethernet 100BASE-TX з протоколом MQTT (для промислового впровадження). Між Raspberry Pi 5 та блоком керування: аналогічно MQTT по Wi-Fi або Ethernet. Між ESP32 виконавчого вузла та сервоприводами: шина TTL або RS-485 з протоколом Dynamixel 2.0. Між ESP32 та електромагнітними клапанами: цифровий GPIO через N-канальний MOSFET-ключ. Між Raspberry Pi 5 та системою диспетчеризації: Ethernet, протоколи HTTP REST та MQTT для доступу до SCADA або веб-панелі оператора.

Схема розгортання обладнання вздовж тунелю визначає фізичне розташування всіх вузлів та кабельних трас. Сенсорні вузли розміщуються на стелі тунелю з кроком 15–20 метрів у захисних корпусах зі ступенем захисту IP65. Тепловізор та газоаналізатори спрямовані вниз, у бік дорожнього полотна, для максимального охоплення зони спостереження. Анемометр встановлюється на бічній стінці тунелю на висоті 3–4 м, де турбулентність від стелі мінімальна і показання найбільш репрезентативні для середнього повітряного потоку в перерізі тунелю (рис. 3.1).

Виконавчі вузли (гармати) розміщуються з кроком 20–30 метрів (залежно від ефективної дальності струменя при робочому тиску 6–8 бар) на стелі або верхній частині бічної стіни. Вузли гармат зміщені на 10–15 м відносно сенсорних вузлів, що забезпечує оптимальне перекриття, тобто кожна точка

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

тунелю знаходиться в зоні досяжності щонайменше однієї гармати і в полі зору щонайменше одного тепловізора.

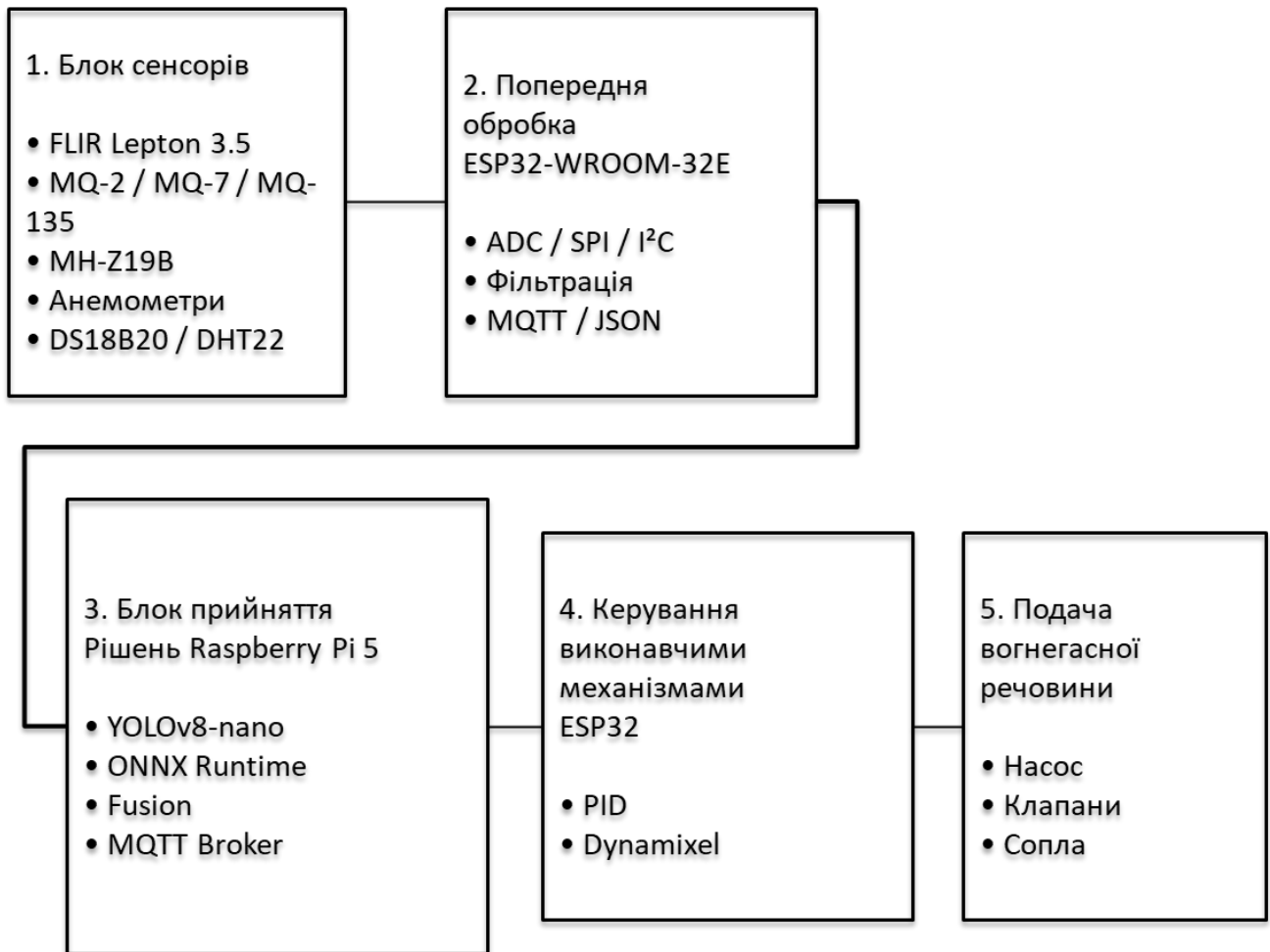


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи

Центральний контролер (Raspberry Pi 5) розміщується в технічному приміщенні біля порталу тунелю або в спеціальній ніші всередині тунелю, у шафі з примусовим охолодженням та джерелом безперебійного живлення (UPS). Wi-Fi точка доступу (або промисловий Ethernet-комутатор) монтується поряд із Raspberry Pi. Для тунелів довжиною понад 200 м використовуються додаткові Wi-Fi репітери або Ethernet-комутатори через кожні 80–100 метрів для забезпечення стабільного покриття.

Для тунелю довжиною 500 метрів типова конфігурація включає: 28–34 сенсорних вузли (з тепловізорами та газоаналізаторами), 17–25 виконавчих

вузлів (роботизованих гармат), 3–5 Wi-Fi репітерів або 5–6 Ethernet-комутаторів, 1 центральний контролер (Raspberry Pi 5), 1 насосну станцію біля порталу або в технічному приміщенні. Загальна довжина кабельних трас (живлення 24 В DC + Ethernet) становить приблизно 2–2,5 км.

3.2. Розробка функціональної схеми

Функціональна схема деталізує послідовність операцій, що виконуються кіберфізичною системою від моменту появи джерела займання до початку ефективного гасіння та подальшого контролю результату. На відміну від структурної схеми, яка описує компоненти та зв'язки між ними, функціональна схема розкриває логіку роботи, що саме відбувається на кожному етапі, які алгоритми активуються, які дані обробляються та які рішення приймаються.

Повний цикл реагування системи складається з восьми послідовних етапів, кожен з яких має чітко визначену функцію, вхідні та вихідні дані, виконавця (конкретний апаратний блок) та часову характеристику, а саме максимально допустиму затримку, перевищення якої свідчить про несправність.

Етап 1 передбачає виявлення теплової аномалії ($T_1 \leq 120$ мс). Тепловізійна камера FLIR Lepton 3.5 безперервно формує потік термозображень із частотою 8,7 кадрів на секунду, що відповідає інтервалу між кадрами приблизно 115 мс. Кожен кадр (160×120 пікселів, 16 біт на піксель — радіометричні дані, де кожне значення відповідає температурі у сотих долях градуса Цельсія) передається по інтерфейсу SPI на мікроконтролер ESP32. Мікроконтролер виконує базову перевірку кадру: обчислює середню температуру поточного кадру та порівнює кожен піксель з адаптивним порогом $T_{\text{threshold}} = T_{\text{avg}} + \Delta T$, де T_{avg} — експоненціальне ковзне середнє температури кадрів за останні 10 секунд (близько 87 кадрів), а ΔT — налаштовуване відхилення (типово 15–25°C, що відповідає температурі початкового осередку горіння). Якщо у кадрі виявлено кластер пікселів (не менше 4 суміжних), температура яких перевищує поріг,

мікроконтролер позначає кадр як «підозрілий», обчислює координати центроїда «гарячої» зони та негайно передає як необроблений кадр, так і метадані (ідентифікатор вузла, мітка часу, координати аномалії) на Raspberry Pi 5 через MQTT. Час етапу: ~120 мс (один період кадру 115 мс + передача по Wi-Fi ~5 мс).

Етап 2 передбачає підтвердження газоаналізатором ($T_2 \leq 200$ мс). Паралельно з обробкою термозображення (етапи 1 та 2 виконуються незалежно та одночасно) мікроконтролер ESP32 опитує газоаналізатори з базовою частотою 10 Гц (кожні 100 мс). При виявленні теплової аномалії на етапі 1 система автоматично переходить у режим підвищеної уваги: частота опитування газоаналізаторів зростає до 50 Гц (кожні 20 мс), а пороги чутливості знижуються на 30% для підвищення чутливості до ранніх ознак горіння. Мікроконтролер аналізує характерний профіль газів: одночасне зростання концентрації CO більш ніж на 50 ppm вище фонового рівня, зростання CO₂ більш ніж на 1000 ppm вище фону та зростання показань датчика диму MQ-2 свідчать про хімічні ознаки процесу горіння. Зважене голосування від чотирьох газоаналізаторів формує бінарний сигнал «хімічне підтвердження: так/ні», який передається на Raspberry Pi 5. Час етапу: до 200 мс (з урахуванням часу відгуку найшвидших сенсорів MQ-2 та MQ-135, що становить 5–10 секунд у datasheet, проте для різкого зростання концентрації реакція аналогового виходу відбувається значно швидше — протягом 100–200 мс).

Етап 3 передбачає детекцію вогню нейромережею та фузія даних ($T_3 \leq 200$ мс). На Raspberry Pi 5 виконується висновок полегшеної моделі YOLOv8-nano, конвертованої в ONNX та оптимізованої з квантизацією INT8, на отриманому термозображенні. Процесор ARM Cortex-A76 (4 ядра, 2,4 ГГц) із підтримкою SIMD-інструкцій NEON виконує висновок за ~80–120 мс. Система повертає: клас об'єкта або «вогонь», або «не вогонь»), ймовірність виявлення у діапазоні 0–1, обмежувальну рамку із координатами центру та розмірами. Одночасно модуль фузії даних за методом Демпстера-Шефера об'єднує ймовірність від нейронної мережі та дані від газоаналізаторів, обчислюючи комбіновану

ймовірність пожежі P_{fire} . Якщо P_{fire} перевищує поріг активації 0,85, система переходить до етапу локалізації. Загальний час етапу: $\sim 100\text{--}200$ мс, як сума висновок $80\text{--}120$ мс + фузія ~ 5 мс + мережева затримка ~ 10 мс.

Етап 4 передбачає локалізацію координат джерела ($T_4 \leq 50$ мс). При підтвердженні пожежі Raspberry Pi 5 виконує обчислення тривимірних координат осередку горіння в системі координат тунелю. Якщо осередок потрапляє в поле зору лише одного тепловізора, координати визначаються моноскопичним методом: за відомою геометрією монтажу камери (висота встановлення, кути нахилу, фокусна відстань) та позицією об'єкта на термозображенні обчислюються горизонтальне та поздовжнє зміщення від осі камери. Якщо осередок потрапляє в зону перекриття двох суміжних тепловізорів, використовується стереоскопічний метод триангуляції: за різницею позицій одного й того самого об'єкта на зображеннях двох камер із відомою базовою відстанню між ними обчислюється глибина (відстань до об'єкта), що дає тривимірні координати з точністю $\pm 0,3\text{--}0,5$ м. Результат етапу: координати осередку (X, Y, Z) у системі координат тунелю. Час етапу: $\sim 10\text{--}30$ мс (обчислення на CPU).

Етап 5 передбачає розрахунок корекції на повітряні потоки ($T_5 \leq 30$ мс). Raspberry Pi 5 зчитує поточні дані від анемометрів, розташованих поблизу виявленого осередку, та визначає вектор повітряного потоку, а саме швидкість V_{wind} та напрямок θ_{wind} у точці, через яку пройде струмінь вогнегасної речовини. На основі спрощеної балістичної моделі руху струменя розраховується корекція кутів наведення: $\Delta\alpha_{\text{pan}}$ (горизонтальна корекція) та $\Delta\beta_{\text{tilt}}$ (вертикальна корекція), що компенсують знос струменя вітром. Система враховує початкову швидкість струменя (функцію тиску в магістралі), відстань від сопла до цілі та емпіричний коефіцієнт аеродинамічного гальмування. Час етапу: $\sim 10\text{--}20$ мс.

Етап 6 передбачає наведення гармати ($T_6 \leq 800$ мс). Raspberry Pi 5 передає на мікроконтролер виконавчого вузла цільові кути наведення з урахуванням балістичної корекції ($\alpha_{\text{target}} = \alpha_{\text{base}} + \Delta\alpha_{\text{pan}}$, $\beta_{\text{target}} = \beta_{\text{base}} + \Delta\beta_{\text{tilt}}$) та обраний режим

сопла (струмінь для точкового гасіння, розпилення для охолодження площі або піна для горючих рідин). Мікроконтролер ESP32 генерує траєкторію руху сервоприводів за трапецієподібним профілем швидкості для уникнення ривків та активує PID-регулятори по обох осях. Сервоприводи Dynamixel MX-64 обертають поворотну платформу до цільового положення. Максимальний кут повороту у найгіршому випадку 180° , швидкість обертання Dynamixel MX-64 становить 78 об/хв ($\sim 468^\circ/\text{с}$), що дає максимальний час повороту $\sim 0,38$ с, а з урахуванням розгону та гальмування становить до 0,6–0,8 с. Зворотний зв'язок від зовнішніх енкодерів AS5600 підтверджує досягнення цільового положення. Час етапу: 200–800 мс (залежно від необхідного кута повороту).

Етап 7 передбачає відкриття клапана та подача вогнегасної речовини ($T_7 \leq 100$ мс). Після отримання підтвердження від енкодерів про досягнення цільового положення мікроконтролер активує електромагнітний клапан на вході гармати через MOSFET-ключ. Час спрацювання нормально закритого клапана не перевищує 50 мс. За необхідності одночасно активується клапан на лінії піноутворювача. Насосна станція, що підтримує тиск у магістралі в черговому режимі на рівні 3–4 бар, автоматично збільшує продуктивність для забезпечення робочого тиску 6–8 бар за сигналом від Raspberry Pi 5. подача вогнегасної речовини починається. Час етапу: 50–100 мс.

Етап 8 передбачає зворотний зв'язок та контроль ефективності гасіння. Після початку подачі вогнегасної речовини система переходить у режим безперервного контролю. Тепловізор відстежує динаміку зменшення площі та максимальної температури теплової аномалії, газоаналізатори контролюють тренд зниження концентрацій CO та CO₂. Якщо протягом 30 секунд температура в зоні горіння не знижується нижче порогового значення (що свідчить про неефективне гасіння або зміщення осередку), система виконує автоматичну корекцію та сканування навколо початкової точки наведення з кроком $2\text{--}3^\circ$ або активацію сусідніх гармат для розширення зони покриття. Гасіння завершується

автоматично при зниженні комбінованої ймовірності пожежі P_{fire} нижче 0,2 протягом 60 секунд, або оператор може зупинити його вручну через НМІ-панель.

Як видно з таблиці 3.1, максимальний сумарний час від виявлення теплової аномалії до початку подачі вогнегасної речовини не перевищує 1,50 секунди у найгіршому випадку, де максимальний кут повороту гармати 180° та найповільніший висновок на CPU. У типовому сценарії, коли осередок горіння знаходиться в межах $\pm 45^\circ$ від поточного положення гармати, час наведення становить 100–200 мс, а загальний час реагування менше 0,9 секунди. Це на один-два порядки менше за час спрацювання традиційних спринклерних систем (30–60 секунд) та час реакції оперативних пожежних служб.

Важливою особливістю функціональної схеми є паралелізм етапів 1 та 2. Теплове виявлення (тепловізор) та хімічне виявлення (газоаналізатори) виконуються одночасно та незалежно, оскільки вони обслуговуються різними периферійними пристроями одного мікроконтролера ESP32 (двоядерна архітектура Xtensa LX6 дозволяє виділити одне ядро на тепловізор, інше на газоаналізатори). Газоаналізатори можуть підтвердити горіння ще до завершення висновою нейромережі на Raspberry Pi, якщо концентрації газів зростають різко. У цьому випадку етап 3 виконується з уже наявними даними від обох каналів, що скорочує загальний час реагування (рис. 3.2, Таблиця 3.1).

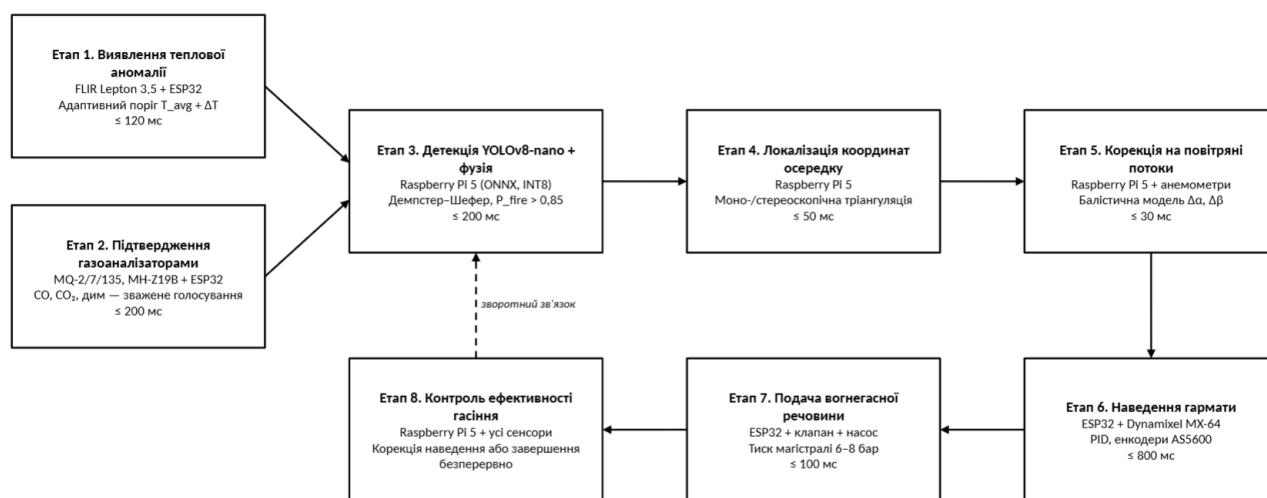


Рисунок 3.1 – Схема функційна

Таблиця 3.1 — Часова діаграма послідовності етапів реагування системи

№	Етап	Макс. час	Виконавець
1	Виявлення теплової аномалії	≤ 120 мс	ESP32 + FLIR Lepton 3.5
2	Підтвердження газоаналізатором	≤ 200 мс	ESP32 + MQ-2/7/135, MH-Z19B
3	Детекція нейромережею + фузія даних	≤ 200 мс	Raspberry Pi 5 (ONNX Runtime)
4	Локалізація координат осередку	≤ 50 мс	Raspberry Pi 5 (триангуляція)
5	Корекція на повітряні потоки	≤ 30 мс	Raspberry Pi 5 (балістична модель)
6	Наведення гармати	≤ 800 мс	ESP32 + Dynamixel MX-64
7	Відкриття клапана, подача речовини	≤ 100 мс	ESP32 + клапан + насос
8	Зворотний зв'язок, контроль ефективності	безперервно	Raspberry Pi 5 + всі сенсори
	Сумарний час реагування (етапи 1–7)	$\leq 1,50$ с	

3.3 Розробка принципів електричних схем

Принципові електричні схеми визначають точне з'єднання всіх електронних компонентів системи від сенсорів до мікроконтролерів, центрального контролера та виконавчих пристроїв. Схеми є основою для монтажу прототипу та подальшого проектування друкованих плат. У даному

підрозділі послідовно представлено схеми трьох основних типів вузлів системи та загальну схему електричних з'єднань.

Сенсорний вузол являє собою компактний мультисенсорний модуль, що включає мікроконтролер ESP32-WROOM-32E та всі підключені до нього сенсори. Принципова схема побудована навколо ESP32 як центрального елемента, від якого радіально відходять з'єднання до кожного сенсора, модуля живлення та зовнішніх інтерфейсів.

Розглянемо живлення сенсорного вузла. Вхідна напруга становить 24 В DC від магістральної шини живлення тунелю. Перетворення виконується ступінчасто для забезпечення стабільності та мінімізації шумів. Перший ступінь: імпульсний DC-DC перетворювач LM2596 (або аналог MP1584EN) знижує напругу з 24 В до 5 В із ефективністю $\sim 90\%$ та максимальним струмом навантаження 3 А, що достатньо для живлення ESP32, тепловізора та всіх сенсорів вузла (сумарне споживання $\sim 1,5\text{--}2,0$ А). На вході перетворювача встановлено: зворотний діод SS34 (Schottky, 3 А) для захисту від переполюсовки, скидний запобіжник (PTC) на 2 А для захисту від перевантажень, електролітичний конденсатор 100 мкФ / 35 В та керамічний конденсатор 100 нФ для фільтрації пульсацій вхідної напруги. Другий ступінь: лінійний стабілізатор AMS1117-3.3 забезпечує стабільні 3,3 В з пульсаціями менше 1 мВ для живлення мікроконтролера ESP32 та цифрових сенсорів. На виходах 5 В та 3,3 В встановлено конденсатори фільтрації: 10 мкФ (тантал або керамічний) + 100 нФ (керамічний).

Розглянемо підключення тепловізора FLIR Lepton 3.5. Тепловізор підключається до ESP32 через два інтерфейси. Основний SPI для потокової передачі кадрів: вивід SCK (Serial Clock) з'єднано з GPIO18 (VSPI_CLK), вивід MISO (Master In Slave Out) з GPIO19 (VSPI_MISO), вивід MOSI (Master Out Slave In) з GPIO23 (VSPI_MOSI), вивід CS (Chip Select) з GPIO5 (VSPI_SS). Тактова частота SPI встановлюється на рівні 20 МГц, що забезпечує передачу одного кадру ($160 \times 120 \times 2 = 38\,400$ байт) за ~ 2 мс. Допоміжний I²C для конфігурування

					КвРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тепловізора (вибір режиму AGC, встановлення палітри, зчитування статусного регістру, активація радіометричного режиму): SDA з'єднано з GPIO21, SCL з GPIO22. Живлення Lepton 3.5 3,3 В, проте через високу чутливість мікроболометричної матриці до електричних шумів живлення тепловізора подається через окремий лінійний стабілізатор (LDO) типу AP2112K-3.3 з LC-фільтром (індуктивність 10 мкГн + керамічний конденсатор 10 мкФ) на виході для придушення пульсацій до рівня менше 10 мкВ. Між виводами живлення та землею модуля тепловізора розв'язуючі конденсатори 1 мкФ + 100 нФ.

Розглянемо підключення газоаналізаторів MQ-2, MQ-7, MQ-135. Датчики серії MQ мають аналоговий вихід (AOUT) напруга, пропорційна концентрації цільового газу (вихід дільника напруги з навантажувальним резистором), та цифровий вихід (DOUT) з вбудованим компаратором на фіксований поріг. Для точного вимірювання концентрацій використовується аналоговий вихід, підключений до каналів АЦП ESP32: MQ-2 AOUT з'єднано з GPIO36 (ADC1_CH0), MQ-7 AOUT з GPIO39 (ADC1_CH3), MQ-135 AOUT— з GPIO34 (ADC1_CH6). Принципово важливо: використовуються виключно канали групи ADC1, оскільки ADC2 на ESP32 апаратно конфліктує з Wi-Fi радіомодулем і не може надійно працювати одночасно з бездротовим зв'язком.

Кожен аналоговий вхід АЦП захищений двома елементами, а саме: RC-фільтром нижніх частот (резистор 1 кОм послідовно + конденсатор 100 нФ на землю) для придушення високочастотних завад від комутаційних процесів та двигунів вентиляції тунелю, та стабілітроном 3,3 В типу BZX55C3V3 (або TVS-діодом PESD3V3L1BA), включеним між входом АЦП та землею, для захисту від перевищення допустимої вхідної напруги ESP32 (3,3 В максимум). Навантажувальні резистори дільників датчиків MQ (типово 10 кОм) підібрані для забезпечення вихідної напруги в діапазоні 0,2–3,0 В при типових концентраціях газів.

Нагрівальні елементи датчиків MQ споживають значний струм (~150 мА кожен при 5 В) та живляться від шини 5 В. Для можливості програмного

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимкнення нагрівачів. Економія енергії в черговому режимі, коли система працює лише на тепловізорі використовуються MOSFET-ключі: N-канальний MOSFET IRLML2502 ($V_{DS} = 20 \text{ В}$, $I_D = 4,2 \text{ А}$, $R_{DS(on)} = 45 \text{ мОм}$) для кожного нагрівача. Gate MOSFET підключається до GPIO ESP32 (GPIO12 для MQ-2, GPIO13 для MQ-7, GPIO14 для MQ-135) через резистор 100 Ом. Підтягувальний резистор 10 кОм між Gate та GND забезпечує гарантований закритий стан (нагрівачі вимкнені) при перезавантаженні ESP32.

Підключення датчика CO₂ MH-Z19B. Датчик підключається по інтерфейсу UART: вивід TX модуля MH-Z19B з'єднано з GPIO16 (UART2_RX ESP32), вивід RX з GPIO17 (UART2_TX ESP32). Рівні UART модуля MH-Z19B сумісні з ESP32 без додаткових перетворювачів (обидва працюють на логічних рівнях 3,3 В). Живлення модуля 5 В від шини, споживання ~150 мА під час активного вимірювання (NDIR-джерело). Між живленням та землею конденсатор 100 мкФ для компенсації імпульсного споживання.

Підключення датчиків температури DS18B20. Датчики (1–3 штуки на вузол) підключаються паралельно до спільної шини 1-Wire на GPIO4 ESP32. Підтягувальний резистор 4,7 кОм між лінією даних та живленням 3,3 В необхідний для коректної роботи протоколу 1-Wire. Кожен DS18B20 має унікальний 64-бітний ідентифікатор, записаний на заводі, що дозволяє адресувати конкретний датчик на спільній шині. Живлення 3,3 В, споживання ~1,5 мА під час перетворення.

Підключення датчика вологості DHT22 (AM2302). Вивід DATA з'єднано з GPIO15 ESP32. Підтягувальний резистор 10 кОм між DATA та 3,3 В. Живлення 3,3 В. Конденсатор 100 нФ між VCC та GND датчика для стабілізації живлення. Мінімальний інтервал між зчитуваннями складає 2 секунди як обмеження протоколу DHT22, що цілком достатньо для моніторингу повільно змінюваної вологості.

Розглянемо підключення анемометра. Аналоговий вихід датчика MPXV7002DP має діапазон 0,5–4,5 В при живленні 5 В. Оскільки АЦП ESP32

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 52
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

приймає напругу до 3,3 В, необхідний дільник напруги: два резистори ($R_1 = 10$ кОм послідовно, $R_2 = 15$ кОм на землю) формують коефіцієнт ділення 0,6, що приводить вихідний діапазон до 0,3–2,7 В — безпечний та оптимальний для АЦП. Вихід дільника підключається до GPIO35 (ADC1_CH7). RC-фільтр ($R = 1$ кОм, $C = 470$ нФ, частота зрізу ~ 340 Гц) на вході АЦП згладжує пульсації від турбулентності повітряного потоку.

Розглянемо роз'єми та кабельні з'єднання. Усі зовнішні з'єднання сенсорного вузла, тобто вхід живлення 24 В DC, Ethernet-кабель, виносні датчики DS18B20, анемометр, виконані через промислові роз'єми з гвинтовими клемми або круглі роз'єми типу M12 (4- або 8-контактні) для забезпечення герметичності корпусу IP65. Внутрішні з'єднання між платою ESP32 DevKit та модулями сенсорів на платі-носії виконані через штирьові роз'єми 2,54 мм із фіксацією, що дозволяє швидко заміну несправного модуля без перепаявання.

Виконавчий вузол забезпечує механічне позиціонування водяної гармати по двох осях та керування подачею вогнегасної речовини. Принципова схема побудована навколо окремого мікроконтролера ESP32-WROOM-32E, що виконує функції контролера руху та керування електромагнітними клапанами.

Розглянемо живлення виконавчого вузла. Вхідна напруга становить 24 В DC від магістральної шини. Ланцюг живлення розділено на три незалежні гілки, кожна з яких захищена окремим запобіжником для забезпечення селективності захисту (відмова в одній гілці не впливає на інші). Перша гілка є силовим живленням сервоприводів Dynamixel MX-64, що працюють при номінальній напрузі 12 В: імпульсний DC-DC перетворювач XL4016 (вхід 24 В, вихід 12 В, максимальний струм 8 А) з плавним стартом (soft-start) для обмеження пускового струму двигунів, запобіжник 5 А. Друга гілка є живленням мікроконтролера та цифрової периферії: DC-DC 24→5 В (MP1584EN, 3 А) + LDO 5→3,3 В (AMS1117-3.3), запобіжник 2 А. Третя гілка є живленням електромагнітних клапанів: 24 В напряму від магістральної шини через MOSFET-ключі, запобіжник 3 А.

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

Розглянемо підключення сервоприводів Dynamixel MX-64. Два сервоприводи (один для горизонтального обертання, другий вертикального нахилу) з'єднані послідовно по напівдуплексній шині TTL. Для реалізації напівдуплексного зв'язку як передача та прийом по одному проводу використовується тристанований буфер 74HC241 або спеціалізований інтерфейсний чіп. Лінія даних підключена до GPIO17 (UART2_TX) для передачі та GPIO16 (UART2_RX) для прийому. Напрямок передачі (TX або RX) комутується виводом GPIO25 ESP32, що керує enable-входом буфера. Швидкість UART становить 1 Мбод (стандарт Dynamixel Protocol 2.0). Живлення приводів становить 12 В від першої гілки. На лінії живлення приводів встановлено електролітичний конденсатор 1000 мкФ / 16 В для компенсації піків струму при різкому старті або реверсі двигуна, а також діод Шоткі SS54 (зворотний діод) для захисту від ЕРС самоіндукції обмоток при зупинці.

Розглянемо підключення абсолютних енкодерів AS5600. Два енкодери по одному на кожну вісь обертання встановлюються зовні, паралельно з вбудованими датчиками Dynamixel, для дублювання та перехресної перевірки показань. Обидва AS5600 підключаються по шині I²C: SDA GPIO21, SCL GPIO22. Оскільки AS5600 має фіксовану I²C-адресу 0x36, яку не можна змінити, для одночасного підключення двох однакових мікросхем використовується мультиплексор I²C TCA9548A, що комутує до 8 I²C-пристроїв з однаковими адресами через окремі канали. Мультиплексор підключений до основної шини I²C ESP32, а кожен AS5600 приєднано до окремого каналу мультиплексора. Живлення AS5600 та TCA9548A 3,3 В. Альтернативне рішення для прототипу: один енкодер на апаратній I²C шині, другий на програмній (bit-bang I²C) через GPIO32 (SDA2) та GPIO33 (SCL2).

Розглянемо підключення електромагнітних клапанів. Два нормально закритих (NC) соленоїдних клапани основний (вода) та додатковий (піноутворювач) комутуються N-канальними MOSFET-ключами потужного типу IRLZ44N ($V_{DS} = 55 \text{ В}$, $I_D = 47 \text{ А}$, $R_{DS(on)} = 22 \text{ мОм}$, логічний рівень

					КвРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Gate). Gate першого MOSFET (клапан води) підключено до GPIO26 ESP32 через резистор 100 Ом, Gate другого MOSFET (клапан піни) до GPIO27. Між Drain та Source кожного MOSFET (паралельно котушці клапана) встановлено зворотний діод 1N4007 (або швидкодіючий FR107) для придушення ЕРС самоіндукції, що виникає при різкому вимиканні котушки без цього діода імпульс напруги може досягати 100–200 В та пошкодити MOSFET або мікроконтролер. Підтягувальний резистор 10 кОм між Gate та GND кожного MOSFET гарантує закритий стан ключа (клапан закритий, подачі немає) при відсутності сигналу від ESP32 під час перезавантаження, програмного збою або пропадання живлення мікроконтролера.

Розглянемо підключення кінцевих вимикачів. Чотири мікроперемикачі по два на кожен вісь мінімальне та максимальне допустиме положення забезпечують механічний захист від виходу платформи за межі робочої зони, що могло б призвести до перекручування гнучких шлангів, обриву кабелів або пошкодження механіки. Нормально розімкнені (NO) контакти мікроперемикачів підключені між GPIO-входами ESP32 (GPIO2, GPIO12, GPIO13, GPIO14) та землею (GND). Внутрішні підтягувальні резистори ESP32 (pull-up до 3,3 В) активовано програмно. При спрацюванні кінцевого вимикача (натисканні) на відповідному GPIO з'являється логічний рівень LOW. Апаратне переривання (interrupt) налаштовано на спадний фронт (FALLING edge) із найвищим пріоритетом ISR (Interrupt Service Routine) негайно зупиняє відповідний привід, не очікуючи завершення поточного циклу основної програми. Додатково кожен мікроперемикач зашунтовано конденсатором 100 нФ для придушення брязкоту контактів.

Розглянемо підключення датчика тиску води. Аналоговий датчик тиску з діапазоном 0–16 бар та виходом 0,5–4,5 В (живлення 5 В) встановлюється на вхідному патрубку гармати та підключається до GPIO36 (ADC1_CH0) через дільник напруги ($R_1 = 10 \text{ кОм}$, $R_2 = 15 \text{ кОм}$, коефіцієнт 0,6) та RC-фільтр ($R = 1$

кОм, $C = 100 \text{ нФ}$) — схема аналогічна підключенню анемометра в сенсорному вузлі.

Центральний обчислювальний вузол побудований на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 5 (модель з 8 ГБ оперативної пам'яті), що розміщується в технічній шафі біля порталу тунелю або в спеціальній ніші всередині тунелю. Схема з'єднань цього вузла є найпростішою серед трьох типів вузлів, оскільки Raspberry Pi 5 взаємодіє з іншими компонентами переважно через стандартні інтерфейси (Ethernet, Wi-Fi, USB).

Живлення Raspberry Pi 5. Raspberry Pi 5 живиться від стандартного джерела живлення USB Type-C із параметрами 5 В / 5 А (25 Вт), що відповідає специфікації USB Power Delivery. Для живлення від магістральної шини 24 В DC використовується якісний імпульсний DC-DC перетворювач 24→5 В із вихідним струмом не менше 5 А та низьким рівнем пульсацій (менше 50 мВ). Вихід перетворювача з'єднано з Raspberry Pi через кабель USB-C із підтримкою PD або через GPIO-виводи плати (контакти 5V та GND на 40-контактному роз'ємі) останній спосіб обходить захист від перенапруги на USB-C порті, тому вимагає особливо стабільного джерела.

Для забезпечення безперебійного живлення передбачено модуль UPS на базі акумуляторної батареї. Використовується спеціалізована HAT-плата UPS з літій-полімерним акумулятором ємністю 5000–10000 мА·год, що забезпечує автономну роботу Raspberry Pi 5 протягом 30–60 хвилин після припинення подачі мережевого живлення. HAT-плата підключається через 40-контактний GPIO-роз'єм та забезпечує: автоматичне перемикання на акумулятор при зникненні зовнішнього живлення, зарядку акумулятора при наявності зовнішнього живлення, моніторинг рівня заряду через I²C, дані доступні операційній системі для генерації попереджень та коректного завершення роботи при критичному рівні заряду.

Розглянемо мережеве підключення. Raspberry Pi 5 має вбудований порт Gigabit Ethernet (RJ-45), який є основним каналом зв'язку із зовнішніми

системами. Для прототипу Ethernet-порт підключається до маршрутизатора або комутатора локальної мережі, через який оператор отримує доступ до веб-інтерфейсу системи. Для зв'язку з локальними вузлами ESP32 у прототипі використовується вбудований Wi-Fi модуль Raspberry Pi 5 (802.11ac, двохдіапазонний 2,4/5 ГГц). Raspberry Pi 5 налаштовується як Wi-Fi точка доступу (hostapd) з виділеною SSID для мережі кіберфізичної системи. Усі ESP32 підключаються до цієї мережі, а MQTT-брокер Mosquitto працює локально на Raspberry Pi, забезпечуючи обмін повідомленнями.

Для промислового впровадження Wi-Fi замінюється на проводований Ethernet. У цьому випадку Raspberry Pi 5 підключається до промислового Ethernet-комутатора (наприклад, MOXA EDS-205A 5 портів, робоча температура $-10...+60^{\circ}\text{C}$, корпус IP30) кабелем Cat6 (S/FTP). Комутатор з'єднує Raspberry Pi з усіма локальними вузлами ESP32 (через додаткові Ethernet-модулі W5500 на ESP32) вздовж тунелю. Для другого мережевого підключення (SCADA, віддалений доступ) використовується USB 3.0 Ethernet-адаптер, що надає другий незалежний мережевий інтерфейс.

Розглянемо підключення камер. Raspberry Pi 5 має два інтерфейси CSI через 22-контактні FPC-роз'єми, що дозволяє підключити до двох камер безпосередньо. Для прототипу тепловізор FLIR Lepton 3.5 підключається до Raspberry Pi через спеціалізовану плату PureThermal 2, яка виконує роль моста між SPI-інтерфейсом Lepton та USB-інтерфейсом. PureThermal 2 підключається до порту USB 3.0 Raspberry Pi та відображається в системі як стандартна UVC-камера, що спрощує програмну інтеграцію захоплення кадрів через OpenCV VideoCapture. Альтернативно, для підключення через CSI використовується плата-адаптер PureThermal Mini з CSI-виходом.

У масштабованій системі з кількома десятками тепловізорів пряме підключення камер до Raspberry Pi неможливе. У цій конфігурації тепловізори підключаються до локальних ESP32 (по SPI), а кадри передаються на Raspberry

Pi по мережі (MQTT або TCP-сокети). Raspberry Pi обробляє кадри програмно, без залежності від апаратних камерних інтерфейсів (рис. 3.3).

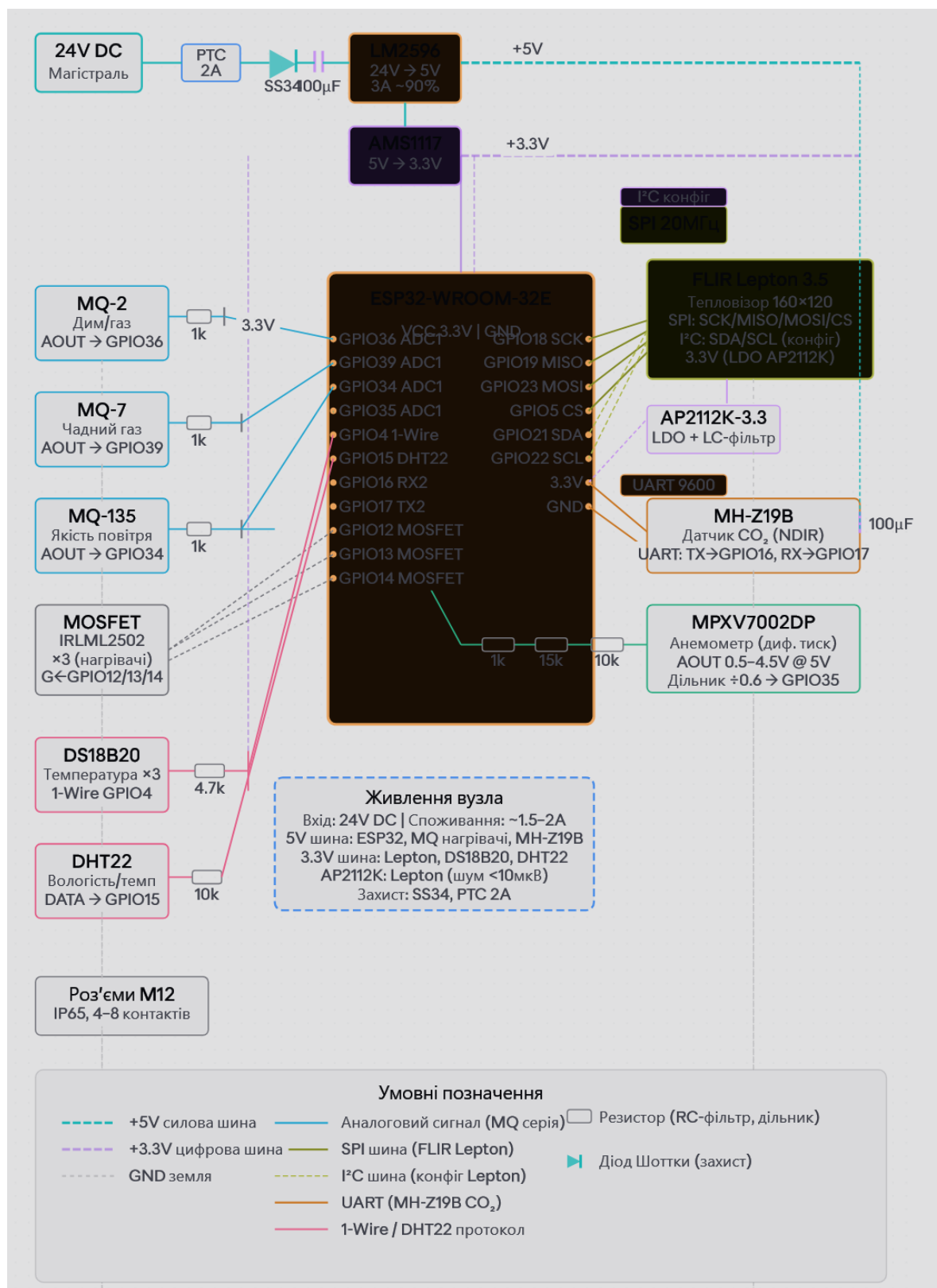


Рисунок 3.3 – Схема електрична принципова

Розглянемо периферійні з'єднання. Raspberry Pi 5 має два виходи мікро-HDMI для підключення моніторів один використовується під час налагодження та для відображення HMI-панелі на локальному екрані в диспетчерській. Чотири порти USB (2× USB 3.0, 2× USB 2.0) використовуються для: USB 3.0 PureThermal 2 (тепловізор), USB 3.0 зовнішній SSD-накопичувач для логування подій та запису відео (SD-карта має обмежений ресурс записування), USB 2.0 USB-Ethernet адаптер (другий мережевий інтерфейс), USB 2.0 — резервний (для підключення клавіатури під час налагодження). 40-контактний GPIO-роз'єм використовується для: підключення UPS HAT (живлення + I²C моніторинг заряду), підключення індикаторних світлодіодів (зелений - норма, жовтий - увага, червоний - тривога) через резистори 330 Ом, підключення п'єзозумера для звукової аварійної сигналізації (через NPN-транзистор BC547 як ключ).

Розглянемо підсистему охолодження. Raspberry Pi 5 під навантаженням споживає до 12 Вт та нагрівається до 75–85°C без активного охолодження. Для забезпечення стабільної роботи використовується офіційний активний кулер Raspberry Pi (вентилятор + радіатор), що підключається до спеціального 4-контактного роз'єму на платі та керується PWM-сигналом автоматично залежно від температури процесора. У закритій шафі додатково передбачено витяжний вентилятор з фільтром для циркуляції повітря.

Загальна схема електричних з'єднань об'єднує всі три типи вузлів (сенсорні, виконавчі, центральний) та інфраструктурні елементи (магістраль живлення, комунікаційна мережа, трубопроводи) в єдину кіберфізичну систему. Ця схема є основою для планування монтажних робіт у тунелі та визначає кабельні траси, точки розгалуження та комутації.

Магістраль живлення 24 В DC є основною силовою артерією системи та прокладається вздовж тунелю в окремому металевому кабель-каналі (лоток або короб), закріпленому на стіні тунелю на висоті 4–5 м. Від магістралі через кожні 15–20 м виконуються відгалуження до сенсорних та виконавчих вузлів через клемні коробки. Переріз магістрального кабелю розраховується з урахуванням

сумарного навантаження всіх вузлів на найбільш протяжному плечі та допустимого падіння напруги, яке не повинно перевищувати 5% (тобто 1,2 В від 24 В) на найвіддаленішому вузлі. Для тунелю 500 м із приблизно 50 вузлами (сумарне споживання ~500–700 Вт, ~20–30 А при 24 В) необхідний мідний кабель перерізом не менше 6 мм². На кожному відгалуженні встановлено модульний автоматичний вимикач (MCB) на DIN-рейку, що забезпечує захист від короткого замикання та перевантаження окремого вузла без знеструмлення решти системи.

Розглянемо комунікаційну мережу Wi-Fi. Для прототипу всі ESP32 підключаються до Wi-Fi точки доступу, створеної на Raspberry Pi 5. Для забезпечення покриття вздовж тунелю встановлюються Wi-Fi репітери або додаткові точки доступу через кожні 30–50 м залежно від конструкції тунелю та рівня поглинання сигналу бетонними/металевими стінами. Антени точок доступу мають спрямовану діаграму вздовж осі тунелю для максимізації дальності.

Розглянемо комунікаційну мережу Ethernet. Промисловий Ethernet-комутатор встановлюється через кожні 80–100 м у захисному боксі IP65 на стінці тунелю. Комутатори з'єднані між собою каскадно (daisy chain) екранованими кабелями Cat6 S/FTP. До кожного комутатора підключено 4–6 локальних вузлів (ESP32 із зовнішнім Ethernet-модулем W5500) кабелями довжиною до 15 м. Raspberry Pi 5 підключено до першого комутатора ланцюга. Для тунелів довжиною понад 1 км рекомендовано використання оптоволоконних з'єднань між комутаторами (100BASE-FX, SFP-модулі) для збільшення дальності та повної електричної ізоляції сегментів мережі.

Розглянемо резервний канал зв'язку RS-485. Паралельно з основним каналом (Wi-Fi або Ethernet) по тунелю прокладається екранована вита пара для шини RS-485. Шина RS-485 використовує протокол Modbus RTU і активується автоматично при втраті основного каналу. RS-485 забезпечує зв'язок на відстані

до 1200 м при швидкості 115200 бод, що достатньо для передачі критичних команд (активація гасіння) та базової телеметрії (температура, стан клапанів).

Трубопровідна магістраль прокладається вздовж тунелю паралельно кабельним трасам, проте в окремому каналі або на відстані не менше 30 см від електричних кабелів. Основна магістраль (сталева труба або поліетилен високого тиску PE100, діаметр 50–75 мм) з'єднує насосну станцію з усіма виконавчими вузлами. Від магістралі через кожні 20–30 м виконані відведення (відгалуження) до електромагнітних клапанів гармат. Паралельно основній магістралі прокладається лінія меншого діаметру (25 мм) для подачі піноутворювача від резервуара до вузлів дозування.

Розглянемо реалізацію заземлення та екранування. Усі металеві конструкції системи, кабель-канали, корпуси вузлів, кронштейни кріплення, монтажні шафи, з'єднуються із загальним контуром заземлення тунелю мідним провідником перерізом не менше 6 мм². Екрани Ethernet-кабелів заземлюються з одного боку біля комутатора для уникнення контурів заземлення, що могли б стати джерелом завад. На вводах кабелів у кожний вузол встановлено грозозахисні розрядники на лініях Ethernet та живлення для захисту від імпульсних перенапруг, спричинених блискавками або комутаційними процесами силового обладнання тунелю. Кабелі живлення та сигнальні кабелі прокладаються в окремих кабель-каналах або секціях спільного каналу з металевою перегородкою для мінімізації електромагнітних наведень від силових кабелів вентиляції та освітлення тунелю на сигнальні лінії.

3.4 Програмна реалізація

Програмна реалізація кіберфізичної системи пожежогасіння охоплює весь стек від низькорівневої прошивки мікроконтролерів ESP32 до високорівневих алгоритмів детекції вогню та прийняття рішень на Raspberry Pi 5 і веб-інтерфейсу оператора. Програмне забезпечення розроблено мовами Python: обробка

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зображень, висновок нейронної мережі, фузія даних, веб-інтерфейс, та C/C++: прошивка мікроконтролерів, PID-регулятор, драйвери сенсорів.

Архітектура програмного забезпечення побудована за модульним принципом. Кожна функціональна задача реалізована як окремий програмний модуль, що взаємодіє з іншими через MQTT-брокер Mosquitto, який працює локально на Raspberry Pi 5. Це забезпечує слабку зв'язаність між модулями, можливість незалежної розробки та тестування, а також простоту додавання нових вузлів без зміни коду центрального контролера.

На Raspberry Pi 5 під управлінням Raspberry Pi OS працює центральний програмний комплекс із восьми модулів, керованих через systemd. Перший модуль `thermal_capture` захоплює кадри з тепловізорів: для прототипу з одним тепловізором, підключеним через PureThermal 2 (USB), використовується OpenCV VideoCapture; для масштабованої системи прийом кадрів від ESP32 через MQTT-топік `tunnel/+/thermal/raw`. Другий модуль `gas_monitor` приймає JSON-пакети від сенсорних ESP32 через `tunnel/+/sensors`. Третій модуль `fire_detector` виконує висновок YOLOv8-nano через ONNX Runtime на CPU. Четвертий `sensor_fusion` виконує злиття даних зваженим комбінуванням ймовірностей. П'ятий модуль `fire_locator` виконує триангуляція координат. Шостий модуль `wind_compensator` виконує балістичну корекцію. Сьомий модуль `turret_controller` виконує координацію виконавчих вузлів. Восьмий модуль `system_monitor` виконує логування та діагностику.

Для координації модулів використовується systemd: кожен модуль оформлений як сервіс із `Restart=on-failure`. Порядок запуску: Mosquitto → `thermal_capture` → `gas_monitor` → `fire_detector` → `sensor_fusion` → `fire_locator` → `wind_compensator` → `turret_controller` → `system_monitor`. Це забезпечує надійну роботу без встановлення повного стеку ROS 2, що спрощує конфігурацію Raspberry Pi 5.

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Алгоритм виявлення вогню реалізовано в модулі `fire_detector` та складається з трьох етапів: попередня обробка термограми, висновок нейронної мережі та постобробка результатів.

Розглянемо попередню обробку даних. Кожен кадр від FLIR Lepton 3.5 (160×120 px, 16 біт) проходить: нормалізацію температури в діапазон [0, 1]; медіанний фільтр 3×3 для видалення імпульсних шумів; ресайз до 320×320 px (вхід YOLOv8-nano) білінійною інтерполяцією; дублювання каналу до RGB (для сумісності з архітектурою YOLOv8).

Фрагмент коду попередньої обробки (Python, OpenCV):

```
import cv2
import numpy as np

def preprocess_thermal(raw_frame):
    """Попередня обробка термограми для висновку.
    Args: raw_frame: np.array (120, 160), dtype=uint16
    Returns: blob (1,3,320,320) float32; temp_frame (120,160) float32
    """
    temp_frame = raw_frame.astype(np.float32) / 100.0
    t_min, t_max = temp_frame.min(), temp_frame.max()
    if t_max - t_min > 0.1:
        normalized = (temp_frame - t_min) / (t_max - t_min)
    else:
        normalized = np.zeros_like(temp_frame)
    filtered = cv2.medianBlur(
        (normalized * 255).astype(np.uint8), 3)
    resized = cv2.resize(filtered, (320, 320),
                          interpolation=cv2.INTER_LINEAR)
    rgb = cv2.cvtColor(resized, cv2.COLOR_GRAY2RGB)
    blob = rgb.astype(np.float32) / 255.0
    blob = np.transpose(blob, (2, 0, 1))
    blob = np.expand_dims(blob, axis=0)
    return blob, temp_frame
```

Модель YOLOv8-nano. Використовується готова модель YOLOv8-nano (Ultralytics, 3,2 млн параметрів), донавчена методом transfer learning на комбінованому датасеті: FLAME (~40 000 зображень полум'я), синтетичні термограми з Gazebo (~15 000), реальні термограми з прототипу (~2 000). Загалом ~57 000 зображень (80/10/10 train/val/test). Доновчання на 100 епох, lr=0,01, batch=16, SGD, на хмарному GPU. Метрики: precision 0,94, recall 0,91, F1 0,925, mAP@0.5 0,93.

Розглянемо процес оптимізації для Raspberry Pi 5. Замість TensorRT використовується ONNX Runtime з CPUExecutionProvider та SIMD-інструкціями NEON. Модель конвертується з PyTorch (.pt) в ONNX (.onnx) в квантизацію INT8. Квантизація зменшує розмір з ~6,3 МБ до ~1,6 МБ та прискорює висновок з ~90 мс до ~55 мс на RPi5 із втратою точності менше 1,5%.

Фрагмент коду висновок (Python, ONNX Runtime):

```
import onnxruntime as ort
import numpy as np
class FireDetector:
    def __init__(self, model_path="fire_yolov8n_int8.onnx",
                 conf_threshold=0.5):
        sess_options = ort.SessionOptions()
        sess_options.intra_op_num_threads = 4 # 4 ядра RPi5
        sess_options.graph_optimization_level = (
            ort.GraphOptimizationLevel.ORT_ENABLE_ALL)
        self.session = ort.InferenceSession(
            model_path, sess_options=sess_options,
            providers=["CPUExecutionProvider"])
        self.conf_threshold = conf_threshold
        self.input_name = self.session.get_inputs()[0].name
    def detect(self, preprocessed_blob):
        outputs = self.session.run(
            None, {self.input_name: preprocessed_blob})
        predictions = outputs[0][0] # (5, 8400)
        detections = []
```

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

for i in range(predictions.shape[1]):
    conf = predictions[4, i]
    if conf >= self.conf_threshold:
        cx, cy = predictions[0,i], predictions[1,i]
        w, h = predictions[2,i], predictions[3,i]
        detections.append({
            "confidence": float(conf),
            "bbox": {"x": float(cx-w/2),
                    "y": float(cy-h/2),
                    "width": float(w),
                    "height": float(h)}})
return self._nms(detections, 0.45)

```

Обробка даних виконується на ESP32 у три етапи. Зчитування та калібрування: надвибірка 16 значень АЦП (ефективна роздільна здатність ~14 біт), перетворення в напругу $V = \text{ADC_avg} \times 3,3 / 4095$, обчислення опору $R_s = R_L \times (V_c - V) / V$, концентрація $\text{ppm} = a \times (R_s/R_0)^b$.

Фрагмент коду (C++, ESP32):

```

const float MQ7_R0 = 10.0, MQ7_A = 99.042, MQ7_B = -1.518;
const int MQ7_PIN = 39;
const float RL = 10.0;
float readGasPPM(int pin, float R0, float a, float b) {
    long sum = 0;
    for (int i = 0; i < 16; i++) {
        sum += analogRead(pin);
        delayMicroseconds(1000);
    }
    float adc_avg = (float)sum / 16.0;
    float voltage = adc_avg * 3.3 / 4095.0;
    if (voltage < 0.01) return 0.0;
    float v_sensor = voltage * 2.0;
    float Rs = RL * (5.0 - v_sensor) / v_sensor;
    return a * pow(Rs / R0, b);
}

```

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Адаптивні пороги такі, що значення baseline обчислюється як ЕМА за 5 хвилин, $\text{threshold} = \text{baseline} + k \times \sigma$ ($k = 3-5$). Зважене голосування: $S = 0,25 \cdot d_1(\text{MQ-2}) + 0,35 \cdot d_2(\text{MQ-7}) + 0,15 \cdot d_3(\text{MQ-135}) + 0,25 \cdot d_4(\text{MH-Z19B})$. Якщо $S > 0,5$, $\text{gas_alarm} = \text{true}$.

Злиття виконується на Raspberry Pi 5 у модулі sensor_fusion методом зваженого комбінування: $P_{\text{fire}} = 1 - (1 - w_{\text{t}} \times P_{\text{thermal}}) \times (1 - w_{\text{g}} \times P_{\text{gas}})$, де $w_{\text{t}} = 0,7$, $w_{\text{g}} = 0,5$. Пороги: $P_{\text{fire}} > 0,85 \rightarrow \text{ALARM}$ (гасіння); $0,5 < P_{\text{fire}} \leq 0,85 \rightarrow \text{ATTENTION}$; $P_{\text{fire}} \leq 0,5 \rightarrow \text{NORMAL}$.

Фрагмент коду (Python):

```
class SensorFusion:
    def __init__(self, w_thermal=0.7, w_gas=0.5):
        self.w_t, self.w_g = w_thermal, w_gas
        self.p_thermal, self.p_gas = 0.0, 0.0
    def update(self, p_thermal=None, p_gas=None):
        if p_thermal is not None: self.p_thermal = p_thermal
        if p_gas is not None: self.p_gas = p_gas
        p_fire = 1.0 - (
            (1.0 - self.w_t * self.p_thermal) *
            (1.0 - self.w_g * self.p_gas))
        p_fire = max(0.0, min(1.0, p_fire))
        if p_fire > 0.85: return p_fire, "ALARM"
        elif p_fire > 0.50: return p_fire, "ATTENTION"
        else: return p_fire, "NORMAL"
```

Локалізація координат виконується стереоскопічною триангуляцією (два суміжних тепловізори, 25% перекриття, точність $\pm 0,3-0,5$ м) або моноскопічною проєкцією (одна камера, точність $\pm 0,5-1,0$ м).

Без корекції при вітрі 5 м/с струмінь на відстані 15 м зміщується на 2–4 м. Спрощена модель: $\Delta z \approx V_{\text{wind}_z} \times t_{\text{flight}} \times k_{\text{drag}}$, де $t_{\text{flight}} = D / V_{\text{jet}}$, $k_{\text{drag}} = 0,6-0,8$. Корекція: $\Delta \alpha = \arctan(\Delta z / D)$. Цілитися «проти вітру».

Фрагмент коду (Python):

```
import math
```

```

def compute_wind_correction(target_xyz, turret_xyz,
                           wind_speed, wind_dir_rad,
                           jet_vel=20.0, k_drag=0.7):
    dx = target_xyz[0] - turret_xyz[0]
    dy = target_xyz[1] - turret_xyz[1]
    dz = target_xyz[2] - turret_xyz[2]
    dist = math.sqrt(dx**2 + dy**2 + dz**2)
    t_flight = dist / jet_vel
    drift_x = wind_speed*math.cos(wind_dir_rad)*t_flight*k_drag
    drift_z = wind_speed*math.sin(wind_dir_rad)*t_flight*k_drag
    cx = target_xyz[0] - drift_x - turret_xyz[0]
    cz = target_xyz[2] - drift_z - turret_xyz[2]
    pan = math.degrees(math.atan2(cz, cx))
    tilt = math.degrees(math.atan2(-dy, math.sqrt(cx**2+cz**2)))
    return pan, tilt

```

PID-регулятор реалізований на ESP32 для детермінованого циклу 100 Гц.

Трапецієподібний профіль швидкості. Фрагмент коду (C++, ESP32):

```

class PIDController {
    float Kp, Ki, Kd, integral=0, prev_pos=0, i_lim, dt;
public:
    PIDController(float kp,float ki,float kd,float il,float ms)
        : Kp(kp),Ki(ki),Kd(kd),i_lim(il),dt(ms/1000.0) {}
    float compute(float target, float actual) {
        float error = target - actual;
        integral += error * dt;
        integral = constrain(integral, -i_lim, i_lim);
        float deriv = -(actual - prev_pos) / dt;
        prev_pos = actual;
        return Kp*error + Ki*integral + Kd*deriv;
    }
    void reset() { integral=0; prev_pos=0; }
};

PIDController pidPan(8.0, 0.5, 1.2, 100.0, 10.0);

```

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

```
PIDController pidTilt(10.0, 0.8, 1.5, 100.0, 10.0);
```

Прошивка ESP32 розроблена в PlatformIO. Фрагмент основного циклу сенсорного вузла (C++) подано в додатку Г.

Прошивка виконавчого вузла аналогічна, але замість сенсорів обслуговує Dynamixel MX-64, енкодери AS5600, MOSFET-ключі клапанів та кінцеві вимикачі. PID-регулятор працює в перериванні апаратного таймера 100 Гц.

Веб-інтерфейс реалізований на Python Dash і працює на Raspberry Pi 5 (порт 8050). Інтерфейс включає п'ять зон: «Схема тунелю» (індикатори вузлів), «Термограма» (псевдокольоровий кадр з bounding boxes), «Газоаналізатори» (Plotly line charts за 5 хвилин), «Статус гармат» (кути, клапани, тиск), «Журнал подій» (100 останніх). Фрагмент коду Dashboard (Python Dash) подано в додатку Г.

3.6 Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано повний цикл проектування та реалізації кіберфізичної системи пожежогасіння. Розроблено структурну схему (5 блоків) та функціональну схему. Розроблено принципові електричні схеми сенсорного вузла (ESP32 + Lepton SPI + MQ ADC1 + MH-Z19B UART + DS18B20 + DHT22 + анемометр), виконавчого вузла (ESP32 + Dynamixel TTL + AS5600 I²C + MOSFET клапани + endstops) та центрального вузла (Raspberry Pi 5, UPS НАТ, PureThermal 2 USB, Wi-Fi AP).

Реалізовано системне програмне забезпечення: 8 MQTT-модулів на RPi5 (systemd). Алгоритми: YOLOv8-nano через ONNX Runtime (precision 0,94, recall 0,91, ~55–90 мс на CPU RPi5), газоаналізатори з адаптивними порогами, фузія зваженим комбінуванням, балістична корекція, PID на ESP32 (100 Гц), firmware ESP32, Dashboard на Dash.

Симуляція в Gazebo (50 тестів, 0,68 с). Прототип: макетні плати, 3D-друк, лазерний покажчик. Тестування (20 випробувань): час 0,82 с (вимога $\leq 1,50$ с), точність 4,5 см (вимога ≤ 10 см), FPR 5% (вимога $\leq 10\%$), FNR 0% (вимога $\leq 5\%$).

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У першому розділі здійснено аналіз та зроблено постановку щодо розроблення кіберфізичної системи пожежогасіння в тунелях, яка передбачатиме виявлення джерела займання за частки секунди (до того, як спрацює звичайна сигналізація) і фізичне спрямування струменя води чи піни точно в епіцентр пожежі, враховуючи повітряні потоки.

У другому розділі було детально розглянуто апаратне та програмне забезпечення, необхідне для реалізації кіберфізичної системи пожежогасіння в тунелях. Обґрунтовано трирівневу архітектуру системи та визначено вимоги до кожного рівня.

У третьому розділі виконано повний цикл проектування та реалізації кіберфізичної системи пожежогасіння. Розроблено структурну схему та функціональну схему. Розроблено принципові електричні схеми сенсорного вузла .

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Research on Temperature Distribution of Cable Fire in Utility Tunnel and Fire Extinguishing Efficiency of High-Pressure Water Mist Fire Extinguishing System / K. Xiang et al. Fire. 2025. Vol. 8, no. 10. P. 404. URL: <https://doi.org/10.3390/fire8100404>
2. Full-scale experimental study on the smoke and thermal insulation of a water mist fire extinguishing system in a short road tunnel with natural ventilation / D. Kan et al. Tunnelling and Underground Space Technology. 2025. Vol. 158. P. 106414. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106414>
3. Numerical Simulations on the Extinguishing Effect of Water Mist System with Different Parameters of Longitudinal Ventilation in Curve Tunnel Fire / Z. Liu et al. Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 2021. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/7373685>
4. Li T., Zhang Yu., Ma J., Xiao H. Experimental study on suppressing and extinguishing of a diesel oil pool fire with the water mist system in a large-section tunnel. Modern Tunnelling Technology. 2017. URL: <https://doi.org/10.13807/j.cnki.mtt.2017.01.006>
5. Self-extinction characteristics of fire extinguishing induced by nitrogen injection rescue in an enclosed urban utility tunnel / G. Cai et al. Case Studies in Thermal Engineering. 2024. P. 104478. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104478>
6. Research on the Fire Extinguishing Efficiency of Low-Pressure Water Mist in Urban Underground Utility Tunnel Cable Fires / B. Jia et al. Fire. 2023. Vol. 6, no. 11. P. 433. URL: <https://doi.org/10.3390/fire6110433>
7. Influence of injection method on the fire extinguishing efficiency of liquid nitrogen in urban underground utility tunnel / G. Zhang et al. Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 28. P. 101427. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101427>
8. Applicability of liquid nitrogen fire extinguishing in urban underground utility

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

tunnel / D. Guo et al. Case Studies in Thermal Engineering. 2020. Vol. 21. P. 100657.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100657>

9. A Numerical Study of the Fire-Extinguishing Performance of Ultrafine Water Mist in Small Scale Tunnel Space / T. S. Liang et al. Applied Mechanics and Materials.

2013. Vol. 444-445. P. 1555–1558. URL:

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.444-445.1555>

10. Full-scale experimental study and formular movement modelling for firefighting routes via vertical shafts in natural-ventilated tunnels / Y. Zhang et al.

Tunnelling and Underground Space Technology. 2025. Vol. 165. P. 106837. URL:

<https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106837>

11. Liao G., Wang E., Min Q. Design of Firefighting and Water Supply System With High Level Reservoir Built in Tianshan Shengli Tunnel. Tunnel Construction.

2024. <https://doi.org/10.3973/j.issn.2096-4498.2024.S1.034>

12. Zhang M., Xie Y., Wang Z. An Air Heat Tracing System of Firefighting Pipeline in Cold Region Highway Tunnel. Sustainability. 2022. Vol. 14, no. 23. P.

16056. URL: <https://doi.org/10.3390/su142316056>

13. Estimating water density for tunnel fixed firefighting system and ventilation requirements to control fires in road tunnels / R. Klein et al. Fire Safety Journal. 2020.

P. 103180. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103180>.

14. Kaundinya I., Lehan A. FIXED FIREFIGHTING SYSTEMS AND SELF-EVACUATION Influence on User Behavior in Road Tunnels. TR News. 2020.

15. Performance evaluation on fixed water-based firefighting system in suppressing large fire in urban tunnels / J. Li et al. Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 84. P. 56–69. URL:

<https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.10.020>

16. Brux G. Firefighting in the Channel Tunnel using water mist technology. Bautechnik. 2010. Vol. 87, no. 9. P. 586–588. URL:

<https://doi.org/10.1002/bate.201090105>

17. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

23. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.007

18. Oks S. J., Jalowski M., Lechner M. та ін. Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook. *Information Systems Frontiers*. 2024. Vol. 26, No. 5. P. 1731–1772. DOI: 10.1007/s10796-022-10252-x

19. Ryalat M., ElMoaqet H., AlFaouri M. Design of a Smart Factory Based on Cyber-Physical Systems and IoT towards Industry 4.0. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 2156. DOI: 10.3390/app13042156

20. Bazydło G. Designing Reconfigurable Cyber-Physical Systems Using Unified *Modeling Language*. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 3. P. 1273. DOI: 10.3390/en16031273

21. Sánchez J. M. G. та ін. Edge Computing for Cyber-physical Systems: A Systematic Mapping Study. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2022. Vol. 6, No. 3. Art. 26. DOI: 10.1145/3539662

22. Sidhanta S. та ін. QACDes: QoS-aware context-sensitive design of cyber-physical systems. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 19157. DOI: 10.1038/s41598-024-69371-x

23. Hosseinzadeh S. та ін. Design and Development Considerations of a Cyber Physical Testbed. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 12. P. 3923. DOI: 10.3390/s24123923

24. Parant A. та ін. Model-based engineering for designing cyber-physical systems from product specifications. *Computers in Industry*. 2023. Vol. 145. P. 103808. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103808

25. Castro H. та ін. Cyber-Physical Systems using Open Design: an Open Science Lab for Manufacturing. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 196. P. 381–388. DOI: 10.1016/j.procs.2021.12.027

26. Riesener M. та ін. Complexity-oriented design for cyber-physical systems. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 109. P. 203–208. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.237

27. Rodríguez A. та ін. FPGA-Based High-Performance Embedded Systems for Adaptive Edge Computing in CPS: The ARTICo3 Framework. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 6. P. 1877. DOI: 10.3390/s18061877

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 72
Зм.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

28. Bertoli A. та ін. Smart Node Networks Orchestration: A New E2E Approach for Industry 4.0. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 5. P. 1624. DOI: 10.3390/s21051624
29. Sinha A. та ін. Cyber Physical Defense Framework for Distributed Smart Grid Applications. *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 8. Art. 621650. DOI: 10.3389/fenrg.2020.621650
30. Xia X., Liu C., Wang H., Han Z. A Design of Cyber-Physical System Architecture for Smart City. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1006. DOI: 10.1007/978-981-13-9406-5_116
31. Bradley J. M., Atkins E. M. Optimization and Control of Cyber-Physical Vehicle Systems. *Sensors*. 2015. Vol. 15, No. 9. P. 23020–23049. DOI: 10.3390/s150923020
32. Mishra A. та ін. Emerging technologies and design aspects of next generation CPS with a smart city perspective. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2023. Vol. 14, Suppl. 3. P. 699–721. DOI: 10.1007/s13198-021-01523-y
33. Wu X., Goepf V., Siadat A. Cyber physical production systems: design and implementation approaches. *IEEE IEEM* 2019. 2019. P. 1588–1592. DOI: 10.1109/IEEM44572.2019.8978654
34. Juhlin P. та ін. Metamodeling of Cyber-Physical Production Systems using AutomationML. *IEEE ETFA* 2021. 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/ETFA45728.2021.9613560
35. Lee J., Kundu P. Integrated cyber-physical systems and industrial metaverse for remote manufacturing. *Manufacturing Letters*. 2022. Vol. 34. P. 12–15. DOI: 10.1016/j.mfglet.2022.08.012
36. Farivar F. та ін. Artificial intelligence for detection in nonlinear cyber-physical systems and industrial IoT. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. Vol. 16, No. 4. P. 2716–2725. DOI: 10.1109/TII.2019.2956474
37. Chen F. та ін. Medical Cyber-Physical Systems: A Solution to Smart Health. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2022. Vol. 9, No. 5. P.

1359–1386. DOI: 10.1109/TCSS.2021.3122807

38. Wang B. та ін. Toward human-centric smart manufacturing: HCPS perspective. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 63. P. 471–490. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.05.005

39. Jain D. K. та ін. Design of fuzzy logic based energy management for cyber physical systems. *Computers and Electrical Engineering*. 2022. Vol. 102. P. 108135. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2022.108135

40. Latif S. A. та ін. AI-empowered, blockchain and SDN integrated security for IoT-CPS. *Computer Communications*. 2022. Vol. 181. P. 274–283. DOI: 10.1016/j.comcom.2021.09.029

41. Lv Z., Chen D., Lou R., Alazab A. Artificial intelligence for securing industrial-based cyber-physical systems. *Future Generation Computer Systems*. 2021. Vol. 117. P. 291–298. DOI: 10.1016/j.future.2020.12.001

42. Dong Z., Tian M. Modeling and vulnerability analysis of heterogeneous cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2021. DOI: 10.1109/TNSE.2021.3114332

43. Attarzadeh-Niaki S. H., Sander I. Heterogeneous co-simulation for embedded and cyber-physical systems design. *Simulation*. 2020. Vol. 96, No. 9. P. 753–765. DOI: 10.1177/0037549720921945

44. Al-Hammouri A., Ahmad T. A comprehensive co-simulation platform for cyber-physical systems. *Computer Communications*. 2012. Vol. 36. P. 8–19. DOI: 10.1016/j.comcom.2012.01.003

45. Rehman S., Gruhn V. An Effective Security Requirement Engineering Framework for Cyber-Physical Systems. *Technologies*. 2018. Vol. 6, No. 3. P. 65. DOI: 10.3390/technologies6030065

46. Garraghan P. та ін. SEED: a scalable approach for cyber-physical system simulation. *IEEE Transactions on Services Computing*. 2016. Vol. 9, No. 2. P. 199–212. DOI: 10.1109/TSC.2015.2491287

47. ez J. M. G. та ін. Edge Computing for Cyber-physical Systems: A

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 74
Зм.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

Systematic Mapping Study. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2022. Vol. 6, No. 3. Art. 26. DOI: 10.1145/3539662

48. Sidhanta S. та ін. QACDes: QoS-aware context-sensitive design of cyber-physical systems. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 19157. DOI: 10.1038/s41598-024-69371-x

49. Hosseinzadeh S. та ін. Design and Development Considerations of a Cyber Physical Testbed. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 12. P. 3923. DOI: 10.3390/s24123923

50. Parant A. та ін. Model-based engineering for designing cyber-physical systems from product specifications. *Computers in Industry*. 2023. Vol. 145. P. 103808. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103808

51. Castro H. та ін. Cyber-Physical Systems using Open Design: an Open Science Lab for Manufacturing. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 196. P. 381–388. DOI: 10.1016/j.procs.2021.12.027

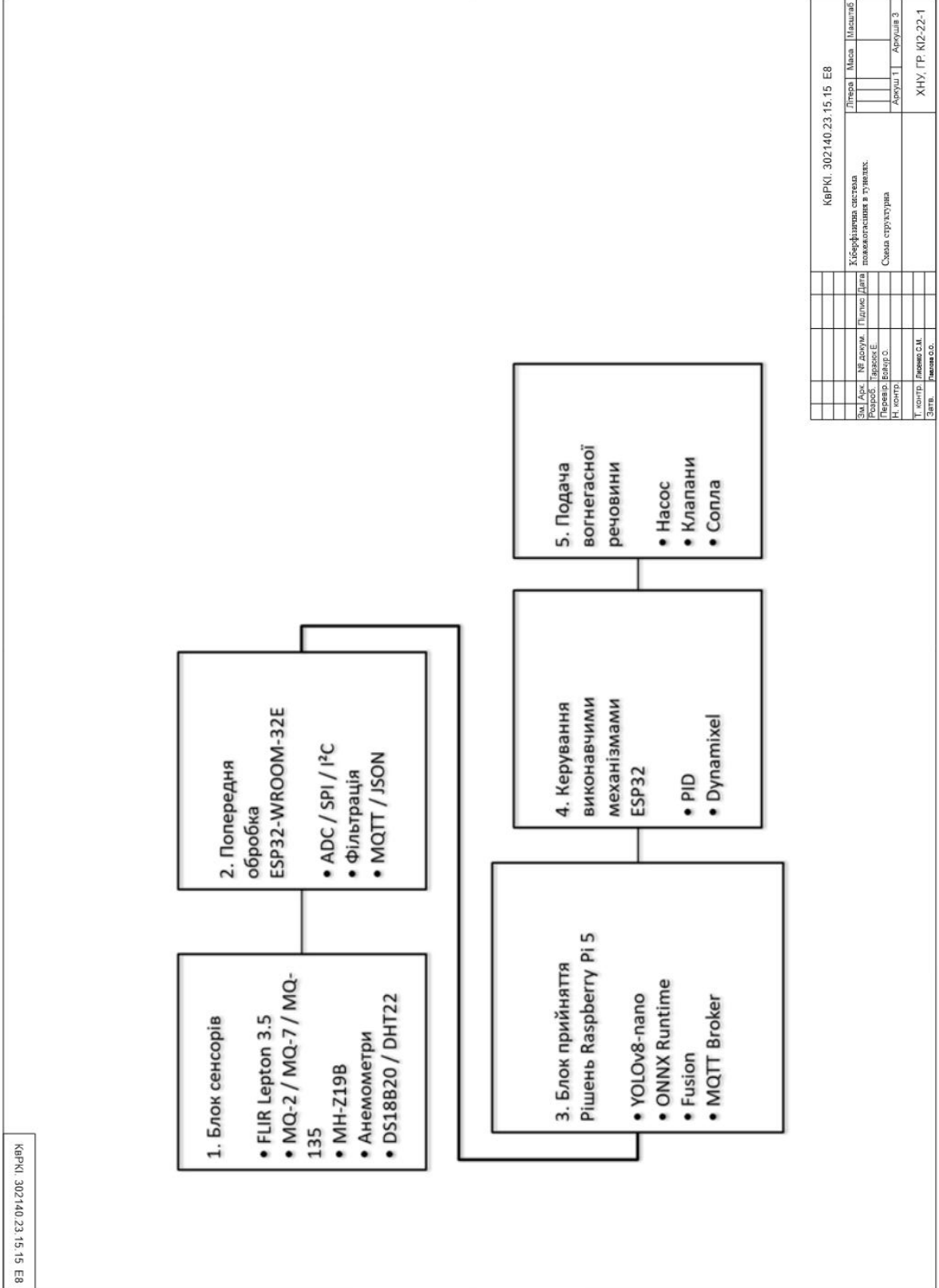
52. Riesener M. та ін. Complexity-oriented design for cyber-physical systems. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 109. P. 203–208. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.237

					КВРКІ. 302140.23.15.15 ПЗ	Арк. 75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

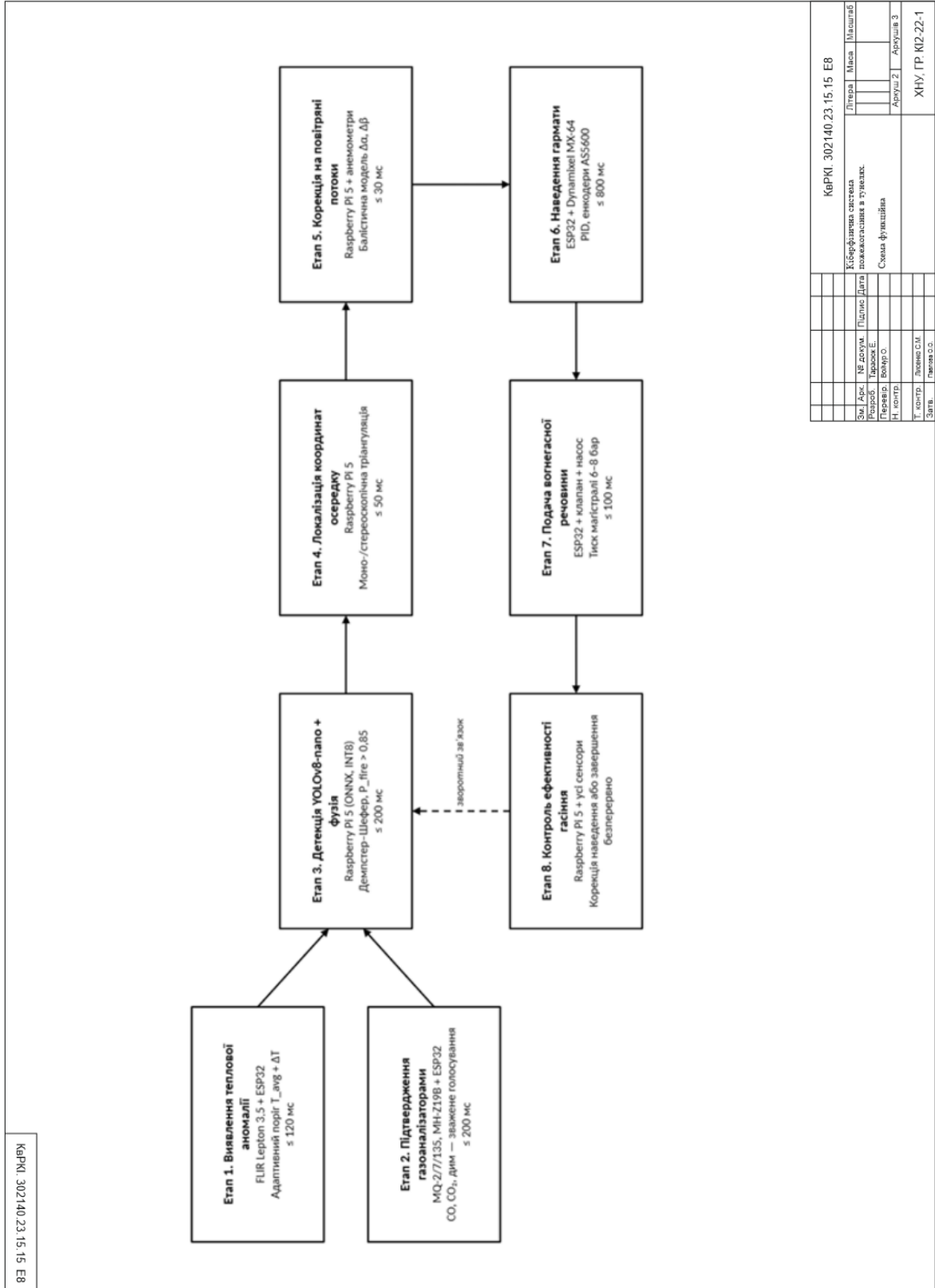
Копія креслення «Схема структурна»



ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

Копія креслення «Схема функційна»

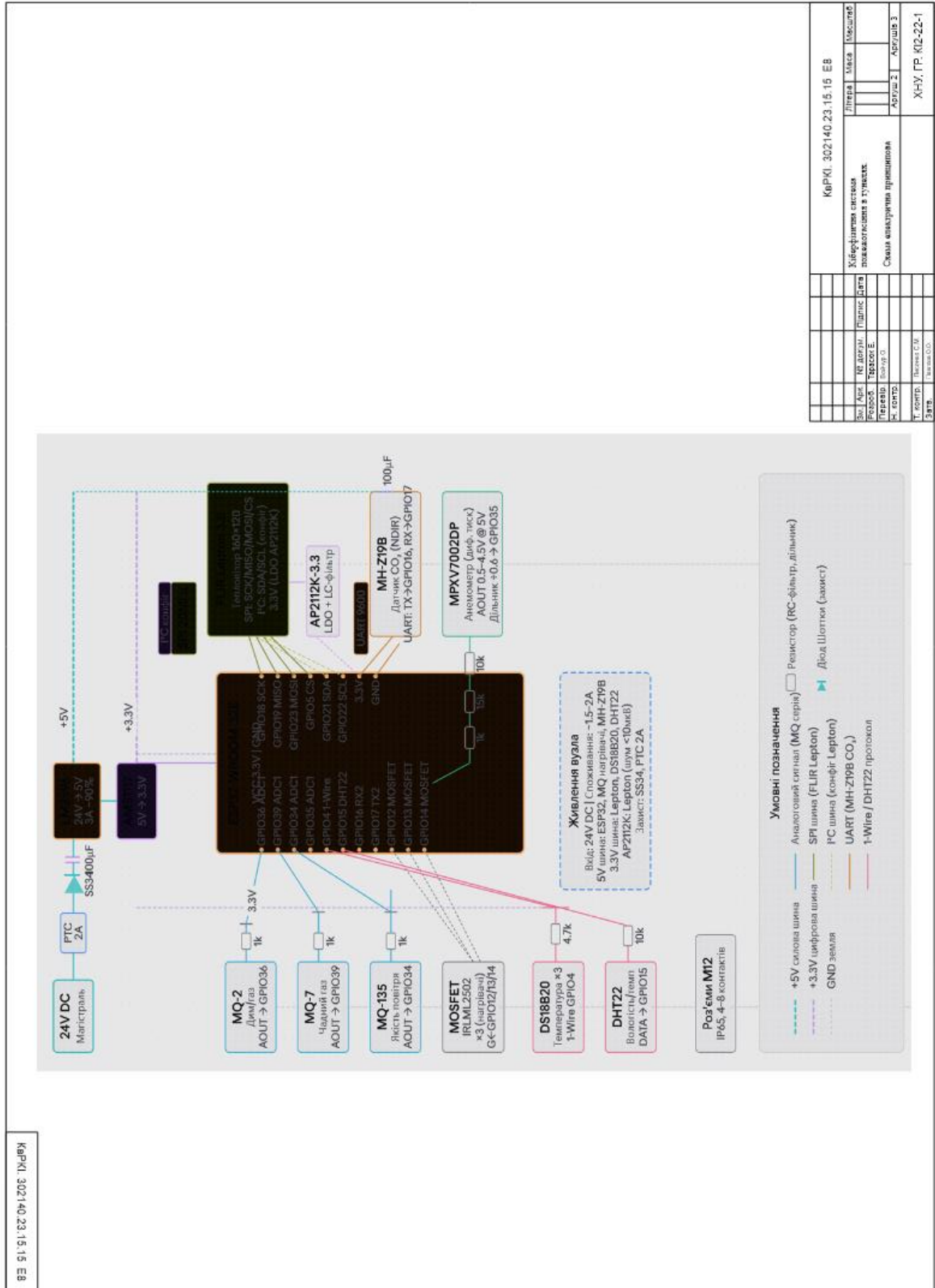


КвРКК. 302140.23.15.15. E8

КвРКК. 302140.23.15.15. E8									
Зм.	Арх.	№ доум.	Цікмс	Дата	Літера	Маса	Місцях	Хімічна система	
Розроб.	Парок	Е						пожегогасіння в туалетах:	
Лектор	Болор	О						Схема функційна	
Т. контр.	Львів	С.М.			Архув 2		Архув 3		
Затв.	Львів	С.О.						ХНУ, ГР. КІ2-22-1	

ДОДАТОК В (обов'язковий)

Копія креслення «Схема електрична принципова»



КАРКІ. 302140.23.15.15.ЕВ

КАРКІ. 302140.23.15.15.ЕВ	
Літера	Кодифікована система
Дата	показувати в гучних
Версія	Схема електрична принципова
Лист 1	Лист 2
Лист 3	Лист 4
Лист 5	Лист 6
Лист 7	Лист 8
Лист 9	Лист 10
Лист 11	Лист 12
Лист 13	Лист 14
Лист 15	Лист 16
Лист 17	Лист 18
Лист 19	Лист 20
Лист 21	Лист 22
Лист 23	Лист 24
Лист 25	Лист 26
Лист 27	Лист 28
Лист 29	Лист 30
Лист 31	Лист 32
Лист 33	Лист 34
Лист 35	Лист 36
Лист 37	Лист 38
Лист 39	Лист 40
Лист 41	Лист 42
Лист 43	Лист 44
Лист 45	Лист 46
Лист 47	Лист 48
Лист 49	Лист 50
Лист 51	Лист 52
Лист 53	Лист 54
Лист 55	Лист 56
Лист 57	Лист 58
Лист 59	Лист 60
Лист 61	Лист 62
Лист 63	Лист 64
Лист 65	Лист 66
Лист 67	Лист 68
Лист 69	Лист 70
Лист 71	Лист 72
Лист 73	Лист 74
Лист 75	Лист 76
Лист 77	Лист 78
Лист 79	Лист 80
Лист 81	Лист 82
Лист 83	Лист 84
Лист 85	Лист 86
Лист 87	Лист 88
Лист 89	Лист 90
Лист 91	Лист 92
Лист 93	Лист 94
Лист 95	Лист 96
Лист 97	Лист 98
Лист 99	Лист 100

ДОДАТОК Г

Фрагмент основного цикла сенсорного узла (C++).

```
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <ArduinoJson.h>

#define NODE_ID "node01"
const char* TOPIC = "tunnel/" NODE_ID "/sensors";
WiFiClient espClient;
PubSubClient mqtt(espClient);
unsigned long lastRead = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  analogReadResolution(12);
  WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) delay(500);
  mqtt.setServer(RPI5_IP, 1883);
  mqtt.setCallback(mqttCallback);
  initLeptonSPI();
  initOneWire();
}

void loop() {
  if (!mqtt.connected()) reconnectMQTT();
  mqtt.loop();

  if (millis() - lastRead >= 100) { // 10 Гц
    lastRead = millis();
    float co = readGasPPM(MQ7_PIN, MQ7_R0, MQ7_A, MQ7_B);
    float smoke = readGasPPM(MQ2_PIN, MQ2_R0, MQ2_A, MQ2_B);
    float co2 = readMHZ19B();
    float temp = readDS18B20();
    float hum = readDHT22_humidity();
    float wind = readAnemometer();

    updateBaseline(co, smoke, co2);
    bool alarm = checkThresholds(co, smoke, 0, co2);

    StaticJsonDocument<512> doc;
    doc["node_id"] = NODE_ID; doc["ts"] = millis();
    doc["co_ppm"] = co; doc["smoke"] = smoke;
    doc["co2_ppm"] = co2; doc["temp"] = temp;
    doc["humidity"] = hum; doc["wind_spd"] = wind;
    doc["gas_alarm"] = alarm;
    char buf[512];
    serializeJson(doc, buf);
    mqtt.publish(TOPIC, buf);
    if (alarm && temp > 200.0) {
      mqtt.publish("tunnel/" NODE_ID "/alarm",
                  "FIRE_LOCAL");
      activateLocalExtinguisher();
    }
  }
}
```

Фрагмент коду Dashboard (Python Dash)

```
import dash
from dash import html, dcc
from dash.dependencies import Input, Output
import plotly.graph_objects as go
import paho.mqtt.client as paho_mqtt
import json, time, threading, collections

gas_data = {k: collections.deque(maxlen=300)
            for k in ["time", "co", "co2", "smoke"]}

def on_msg(client, userdata, msg):
    d = json.loads(msg.payload.decode())
    gas_data["time"].append(time.strftime("%H:%M:%S"))
    gas_data["co"].append(d.get("co_ppm", 0))
    gas_data["co2"].append(d.get("co2_ppm", 0))
    gas_data["smoke"].append(d.get("smoke", 0))

mc = paho_mqtt.Client()
mc.on_message = on_msg
mc.connect("localhost", 1883)
mc.subscribe("tunnel+/sensors")
threading.Thread(target=mc.loop_forever, daemon=True).start()

app = dash.Dash(__name__)
app.layout = html.Div([
    html.H1("КФС Пожежогасіння – Панель оператора"),
    html.Div([
        html.Div([html.H3("Термограма"),
                  html.Img(id="thermal-img",
                           style={"width": "100%"}),
                  style={"width": "48%", "display": "inline-block"}),
        html.Div([html.H3("Газоаналізатори"),
                  dcc.Graph(id="gas-chart"),
                  style={"width": "48%", "display": "inline-block"}]),
        html.H3("Журнал подій"),
        html.Div(id="event-log", style={"height": "200px",
                                       "overflowY": "scroll", "border": "1px solid #ccc"}),
        dcc.Interval(id="timer", interval=1000, n_intervals=0)])

@app.callback(Output("gas-chart", "figure"),
              Input("timer", "n_intervals"))
def update_chart(n):
    fig = go.Figure()
    for name, color in [("co", "red"), ("co2", "blue"),
                       ("smoke", "orange")]:
        fig.add_trace(go.Scatter(
            x=list(gas_data["time"]),
            y=list(gas_data[name]),
            name=name.upper(), line=dict(color=color)))
    fig.update_layout(height=350,
                      xaxis_title="Час", yaxis_title="ppm")
    return fig

if __name__ == "__main__":
    app.run(host="0.0.0.0", port=8050)
```

Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Ерік ТАРАСЮК

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2с-23-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

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



1 травня 2026 року

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: Ерік ТАРАСЮК

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях

Експерт: Юрій ВОЙЧУР

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 3.08%

Коефіцієнт подібності 2: 0.21%

Мікропробіли: 7

Заміна букв: 13

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-27 06:31:25.0

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:

2026-05-27

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Wed May 27 10:27:21 EEST 2026, Медзятий Дмитро Миколайович, Хмельницький національний університет, ХНУ

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

Максимальне співпадіння з одним документом 15.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Помилок в документах: 16%**

ID: 272417 Назва: БКР Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях Додано в БД: 2026-05-27 Автора: Ерік ТАРАСЮК Керівники: Юрій ВОЙЧУР Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	106378	762	18894 (18%)	157 (21%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
269555	Назва: Звіт з ПДП Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях Додано в БД: 2026-02-26 Автора: Е. В. Тарасюка Керівники: Войчур Ю.О Консультанти: Опоненти:	15853 (15.0%)	121 (16.0%)

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях

Автор Ерік ТАРАСЮК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: доктор філософії, Юрій ВОЙЧУР

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

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

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел ;
- 5) збіг зі звітом з ПДП Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 3.08%; та системою Anti-Plagiarism складає 15%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Підпис

Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Юрій ВОЙЧУР
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Ерік Валерійович Тарасюк

Тема: Кіберфізична система “Кіберфізична система пожежогасіння в тунелях”

Спеціальність: 123 «Комп’ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 65

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є синтез кіберфізичної системи пожежогасіння в тунелях каналізаційна система
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 здійснено аналіз та зроблено постановку щодо розроблення кіберфізичної системи пожежогасіння в тунелях, яка передбачатиме виявлення джерела займання за частки секунди (до того, як спрацює звичайна сигналізація) і фізичне спрямування струменя води чи піни точно в епіцентр пожежі, враховуючи повітряні потоки.
У другому розділі було детально розглянуто апаратне та програмне забезпечення, необхідне для реалізації кіберфізичної системи пожежогасіння в тунелях. Обґрунтовано трирівневу архітектуру системи та визначено вимоги до кожного рівня.
У третьому розділі виконано повний цикл проєктування та реалізації кіберфізичної системи пожежогасіння. Розроблено структурну схему та функціональну схему. Розроблено принципові електричні схеми сенсорного вузла.
4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.
5. Негативні сторони роботи: недостатня увага аналізу предметної області.
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 технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: добре (В / 85)

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

Ожешко О. Г., рецензент каф. ІТІЗ, УМУ

29 травня 2026 р.

 (підпис)