

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система адаптації режимів функціонування технічних об'єктів у деградуючому середовищі

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 240490.22.04.86 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група KI2-22-4


Підпис

Артур ВОРОНОВ

Ініціали, прізвище

Керівник доктор техн. наук, професор


Підпис

Єлизавета ГНАТЧУК

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер канд. фіз.-мат. наук, доц.
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Тетяна КИСІЛЬ

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС

«01» червня 2026 р.


Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

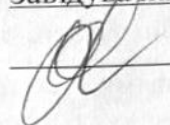
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

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

Воронов Артур Олександрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система адаптації режимів функціонування технічних об'єктів у деградуючому середовищі

Керівник проекту (роботи) Гнатчук Єлизавета Геннадіївна, д.т.н., проф.

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) _____

Дослідження предметної області та постановка задачі адаптації режимів функціонування технічного об'єкта в деградуючому середовищі

Моделювання та проектування кіберфізичної системи адаптації режимів функціонування технічного об'єкта

Програмно-апаратна реалізація та тестування кіберфізичної системи адаптації режимів функціонування технічного об'єкта

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

Результати роботи програмної частини системи

Результати роботи апаратної частини системи

Структурні схеми програмно-апаратної кіберфізичної системи

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

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 напрямку 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 адаптації режимів функціонування технічного об'єкта в деградуєчому середовищі	01.03.2026	ВИКОН.
4	Робота над розділом 2 – моделювання та проектування кіберфізичної системи адаптації режимів функціонування технічного об'єкта	01.04.2026	ВИКОН.
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація та тестування кіберфізичної системи адаптації режимів функціонування технічного об'єкта	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

Артур ВОРОНОВ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

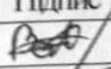

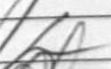
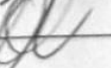
Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Єлизавета ГНАТЧУК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

№ р я д к а	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 240490.22.04.86 ПЗ	Пояснювальна записка	81		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КвРКІ 240490.22.04.86 Е8	Результати роботи програмної частини системи	1		
3		КвРКІ 240490.22.04.86 Е8	Результати роботи апаратної частини системи	1		
4		КвРКІ 240490.22.04.86 Е8	Структурні схеми програмно-апаратної кіберфізичної системи	1		

					КвРКІ 240490.22.04.86 ВП					
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	Відомість проекту			Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Воронов						У	1	1
Перевір.		Гнатчук						ХНУ, КІ2-22-4		
Н. контр.		Кисіль								
Зав.		Павлова		01.06						

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система адаптації режимів функціонування технічних об'єктів у деградуючому середовищі».

Автор роботи: Артур ВОРОНОВ.

Керівник роботи: Єлизавета ГНАТЧУК.

Пояснювальна записка: 81 с., 10 рис., 1 табл., 3 дод., 60 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

ARDUINO, ESP32, АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, АПАРАТНИЙ ВУЗОЛ, ДЕГРАДУЮЧЕ СЕРЕДОВИЩЕ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМНА СИМУЛЯЦІЯ, ТЕХНІЧНИЙ ОБ'ЄКТ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню кіберфізичної системи адаптації режимів функціонування технічного об'єкта в умовах деградуючого середовища. Актуальність теми зумовлена необхідністю забезпечення стабільної роботи технічних систем в умовах зміни параметрів навколишнього середовища та зростанням вимог до ефективності керування.

Метою роботи є розробка програмно-апаратної системи симуляції функціонування технічного об'єкта із реалізацією механізмів адаптивного керування. У роботі проведено дослідження предметної області кіберфізичних систем, розроблено математичну модель, алгоритм адаптації та апаратну частину на базі ESP32.

Результатом роботи є програмно-апаратна система, що дозволяє моделювати поведінку технічного об'єкта в різних умовах експлуатації, імітувати деградуюче середовище та оцінювати ефективність адаптивного керування.



Підпис здобувача

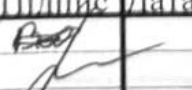
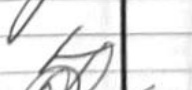


30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Дослідження предметної області та постановка задачі.....	7
1.1 Поняття кіберфізичних систем та їх роль у технічних об'єктах.....	7
1.2 Дослідження деградуючих середовищ та їх вплив на функціонування технічних систем.....	10
1.3 Особливості роботи технічних об'єктів в умовах деградації.....	12
1.4 Існуючі методи адаптації режимів функціонування.....	15
1.5 Дослідження сучасних підходів до моделювання кіберфізичних систем.....	19
1.6 Постановка задачі дослідження.....	21
1.7 Вимоги до системи адаптації режимів функціонування.....	24
1.8 Висновок до першого розділу.....	26
2 Моделювання та проектування кіберфізичної системи.....	28
2.1 Формалізація задачі адаптації режимів роботи.....	28
2.2 Побудова математичної моделі технічного об'єкта.....	30
2.3 Моделювання деградуючих факторів середовища.....	33
2.4 Розробка алгоритму адаптації режимів функціонування.....	36
2.5 Проектування архітектури кіберфізичної системи.....	38
2.6 Опис інформаційних потоків та взаємодії компонентів.....	41
2.7 Вибір технологій реалізації.....	43
2.8 Розробка моделі симуляції роботи системи.....	46
2.9 Висновки до другого розділу.....	48
3 Програмно-апаратна реалізація та тестування системи.....	50
3.1 Загальна структура програмно-апаратної реалізації.....	50
3.2 Реалізація моделі технічного об'єкта.....	52
3.3 Реалізація модуля деградації середовища.....	54
3.4 Реалізація алгоритму адаптації.....	57

КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Виконав		Артур ВОРОНОВ		
Перевір.		Слизова ГНАТЧУК		
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		

Кіберфізична система адаптації режимів функціонування технічних об'єктів у деградуючому середовищі
Пояснювальна Записка

Літера	Аркуш	Аркушів
у	2	72

ХНУ КІ2-22-4

3.5 Розробка інтерфейсу користувача програмної частини	59
3.6 Реалізація апаратної частини на базі ESP32	62
3.7 Проведення симуляційних експериментів програмної частини	65
3.8 Тестування апаратної частини системи	67
3.9 Дослідження результатів роботи системи.....	70
3.10 Висновки до третього розділу	72
Висновки.....	74
Перелік джерел посилань	76
Додаток А Результати роботи програмної частини системи	82
Додаток Б Результати роботи апаратної частини системи	83
Додаток В Структурні схеми програмно-апаратної кіберфізичної системи	84

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку технічних систем спостерігається стійка тенденція до ускладнення їх структури та розширення функціональних можливостей. При цьому, що характерно, підвищення складності не завжди супроводжується пропорційним зростанням надійності. Навпаки, у багатьох випадках виникає ситуація, коли система стає більш чутливою до зовнішніх впливів, навіть якщо ці впливи не є критичними у класичному розумінні. Це особливо проявляється в умовах так званих деградуючих середовищ, де параметри навколишнього середовища змінюються поступово, але невідворотно, створюючи додаткове навантаження на технічний об'єкт.

Паралельно з цим активно розвивається напрям кіберфізичних систем, який, якщо говорити не зовсім формально, поєднує в собі фізичні процеси та обчислювальні механізми керування. У межах такого підходу технічний об'єкт вже не розглядається ізольовано, а функціонує у зв'язці з програмними компонентами, що здійснюють аналіз його стану та приймають рішення щодо зміни режимів роботи. Власне, саме ця інтеграція і відкриває можливість адаптації, хоча реалізувати її на практиці виявляється не настільки просто, як може здатися на перший погляд.

Особливу актуальність набуває задача забезпечення стабільності функціонування технічних об'єктів у змінних, а інколи й несприятливих умовах експлуатації. Наприклад, для лабораторних насосів або компресорів навіть незначне підвищення температури чи поява додаткового опору може призвести до зниження ефективності, перевитрати енергії або, у гіршому випадку, до виходу з ладу. У таких умовах традиційні підходи, засновані на фіксованих режимах роботи, демонструють обмежену ефективність, оскільки вони не враховують динаміку змін середовища.

Таким чином, виникає потреба у розробці систем, здатних адаптувати режими функціонування технічного об'єкта в реальному або наближеному до

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реального часу. При цьому під адаптацією доцільно розуміти не просто зміну параметрів роботи, а цілеспрямований процес, спрямований на підтримання заданих характеристик системи за умов зовнішніх збурень. Слід зазначити, що існуючі рішення у цій сфері або надто складні для практичного впровадження, або потребують значних обчислювальних ресурсів, що не завжди є виправданим.

У рамках даної роботи пропонується підхід до розробки кіберфізичної системи, що забезпечує адаптацію режимів функціонування технічного об'єкта в умовах деградації середовища. При цьому акцент робиться на поєднанні програмної симуляції та апаратної частини, що дозволяє дослідити поведінку системи, змінювати параметри середовища та перевіряти принципи адаптивного керування.

Метою роботи є розробка програмно-апаратної системи, яка реалізує симуляцію функціонування технічного об'єкта у деградуєчому середовищі та забезпечує адаптацію його режимів роботи на основі заданих критеріїв.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- дослідити предметну область кіберфізичних систем та особливості їх застосування;
- дослідити вплив деградуєчих середовищ на технічні об'єкти;
- розглянути існуючі методи адаптації режимів функціонування;
- розробити математичну модель технічного об'єкта та середовища;
- сформулювати алгоритм адаптивного керування;
- реалізувати програмну систему симуляції;
- розробити апаратну частину системи на базі ESP32;
- провести експериментальні дослідження та оцінити ефективність запропонованого підходу.

Об'єктом дослідження є процес функціонування технічного об'єкта в умовах деградуєчого середовища.

Предметом дослідження є методи та алгоритми адаптації режимів роботи технічного об'єкта в складі кіберфізичної системи.

					КВРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи дослідження включають математичне моделювання, комп'ютерну симуляцію, програмно-апаратне моделювання, обробку часових рядів та порівняння отриманих результатів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої програмно-апаратної системи для оцінки ефективності адаптивних алгоритмів керування без необхідності проведення складних експериментів на реальному обладнанні. Крім того, результати роботи можуть бути використані як основа для подальшого розвитку систем автоматизованого керування технічними об'єктами.

Структура роботи визначається поставленою метою та задачами і складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Поняття кіберфізичних систем та їх роль у технічних об'єктах

На сучасному етапі розвитку інформаційних та інженерних технологій спостерігається поступове, але досить відчутне зміщення акценту від ізольованих технічних рішень до інтегрованих систем, у яких поєднуються фізичні процеси та обчислювальні механізми. У цьому контексті поняття кіберфізичних систем (Cyber-Physical Systems, CPS) набуває все більшого поширення, хоча, варто зауважити, його трактування у різних джерелах може дещо відрізнятися за ступенем деталізації та акцентами. У загальному випадку під кіберфізичною системою розуміють таку систему, в якій фізичні компоненти тісно взаємодіють із програмними засобами через механізми збору, передачі та обробки даних, що дозволяє здійснювати керування об'єктом на основі аналізу його поточного стану [1].

Разом із тим, таке визначення є, певною мірою, спрощеним. Якщо розглядати питання глибше, стає очевидним, що ключовою ознакою кіберфізичних систем є не просто наявність обчислювального модуля, а саме замкнений цикл взаємодії: вимірювання, аналіз, вплив. Тобто, система не лише фіксує параметри фізичного середовища, але й інтерпретує їх, формує керуючі дії та впливає на об'єкт, змінюючи його стан. При цьому сам процес є безперервним або квазібезперервним, що, власне, і забезпечує адаптивний характер функціонування.

Якщо спробувати структурувати кіберфізичну систему, можна виділити декілька базових складових. По-перше, це фізичний об'єкт або процес, який підлягає контролю. У межах даної роботи таким об'єктом виступає технічний пристрій, наприклад лабораторний насос або компресор. По-друге, це сенсорна підсистема, яка забезпечує вимірювання параметрів: температури, тиску, швидкості потоку, енергоспоживання тощо. По-третє, обчислювальний модуль,

що виконує обробку отриманих даних і формує рішення щодо подальших дій. І, нарешті, виконавчі механізми, через які ці рішення реалізуються у вигляді зміни режимів роботи об'єкта [2].

Основні складові кіберфізичної системи наведені на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Основні складові кіберфізичної системи

Представлена схема відображає базову структуру кіберфізичної системи та взаємозв'язок між її фізичними, інформаційними й керуючими компонентами.

Окремо слід звернути увагу на роль комунікаційної інфраструктури. У сучасних кіберфізичних системах вона виступає не просто допоміжним елементом, а фактично є невід'ємною частиною загальної архітектури. Передача даних між компонентами може здійснюватися як локально, так і через мережі, що дозволяє створювати розподілені системи з підвищеним рівнем гнучкості. Водночас, це накладає додаткові вимоги до затримок, надійності передачі та синхронізації, що не завжди легко забезпечити на практиці.

Розвиток кіберфізичних систем значною мірою став можливим завдяки прогресу в галузі мікроелектроніки, вбудованих систем та засобів зв'язку. Зменшення розмірів обчислювальних пристроїв при одночасному зростанні їх продуктивності дозволило інтегрувати складні алгоритми безпосередньо у технічні об'єкти. Це, у свою чергу, призвело до появи нових класів систем, які можуть функціонувати автономно або з мінімальним втручанням оператора [3].

У практичному застосуванні кіберфізичні системи охоплюють широкий спектр галузей: від промислового виробництва до медицини та транспортних систем. Проте саме в технічних об'єктах, пов'язаних із перетворенням енергії

або переміщенням рідин і газів, їх використання виглядає особливо доцільним. Це пояснюється тим, що такі об'єкти характеризуються значною кількістю змінних параметрів, які можуть суттєво впливати на ефективність роботи. Наприклад, навіть незначне відхилення температури або тиску від номінальних значень може призвести до зниження продуктивності або збільшення енергоспоживання.

У цьому контексті кіберфізичні системи дозволяють перейти від статичних режимів керування до більш гнучких, адаптивних підходів. Замість фіксованих налаштувань система може змінювати параметри роботи у відповідь на поточний стан середовища. При цьому важливо підкреслити, що адаптація не завжди означає оптимізацію у строгому математичному сенсі. У багатьох випадках достатньо забезпечити стабільність роботи або уникнути критичних режимів, що вже є суттєвим досягненням.

Разом із тим, впровадження кіберфізичних систем супроводжується низкою проблем. Однією з них є складність моделювання фізичних процесів, які часто мають нелінійний характер і залежать від багатьох факторів. Іншою проблемою є необхідність забезпечення надійності системи в умовах невизначеності, коли точні параметри середовища можуть бути невідомі або змінюватися у часі. Крім того, виникає питання узгодження швидкості обчислень із динамікою фізичних процесів, що іноді потребує компромісів між точністю та продуктивністю [4].

Не менш важливим є аспект безпеки та відмовостійкості. Оскільки кіберфізичні системи часто взаємодіють із реальними об'єктами, помилки в алгоритмах керування можуть мати цілком матеріальні наслідки. Це особливо актуально для систем, що працюють у деградуючих середовищах, де навіть незначні похибки можуть накопичуватися та призводити до небажаних ефектів.

Таким чином, кіберфізичні системи являють собою складні інтегровані структури, що поєднують фізичні процеси та обчислювальні механізми керування. Їх роль у технічних об'єктах полягає не лише у забезпеченні

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контролю, але й у створенні передумов для адаптивного функціонування в умовах змінного середовища. Водночас, ефективна реалізація таких систем потребує врахування широкого спектра факторів, починаючи від особливостей фізичних процесів і закінчуючи обмеженнями обчислювальних ресурсів, що робить дану область дослідження досить складною, але водночас і перспективною.

1.2 Дослідження деградуючих середовищ та їх вплив на функціонування технічних систем

У процесі експлуатації технічних об'єктів досить часто виникають умови, які не можна вважати стабільними або такими, що повністю відповідають номінальним параметрам. Йдеться про так звані деградуючі середовища, де характеристики зовнішнього впливу змінюються у часі, причому не обов'язково різко або явно помітно. Навпаки, у більшості випадків ці зміни мають поступовий характер, і саме через це вони довгий час залишаються недооціненими, хоча їх сумарний ефект може бути суттєвим.

Під деградуючим середовищем доцільно розуміти таке середовище, параметри якого з часом погіршуються або змінюються у напрямку, що негативно впливає на функціонування технічної системи. До основних факторів деградації можна віднести підвищення температури, накопичення забруднень, зміну фізичних властивостей робочого середовища, а також зростання механічних або гідравлічних опорів [5]. При цьому важливо враховувати, що вплив цих факторів не є ізольованим, навпаки у більшості випадків вони діють одночасно, підсилюючи один одного.

З практичної точки зору, деградація середовища проявляється у зміні робочих характеристик технічного об'єкта. Наприклад, для насосного обладнання це може означати зниження продуктивності при незмінних вхідних параметрах, збільшення енергоспоживання або підвищення температури

					КВРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

окремих вузлів. У випадку компресорів додатково можуть виникати коливання тиску, нестабільність потоку або зростання втрат на тертя. Такі зміни, якщо їх не враховувати, можуть призводити до поступового виходу системи за межі допустимих режимів [6].

Окремої уваги заслуговує питання накопичувального ефекту деградації. На відміну від разових збурень, які можуть бути компенсовані або навіть залишитися непоміченими, деградуючі фактори діють тривало, що призводить до поступового погіршення характеристик системи. У певний момент це може проявитися у вигляді різкого падіння ефективності або навіть відмови обладнання. При цьому складність полягає у тому, що точний момент переходу від допустимого стану до критичного не завжди можна визначити заздалегідь [7].

Ще одним важливим аспектом є стохастичний характер деградації. Реальні середовища рідко змінюються строго детерміновано, у більшості випадків спостерігаються випадкові коливання параметрів, які накладаються на загальну тенденцію погіршення. Це ускладнює як моделювання, так і прогнозування поведінки системи. Відповідно, виникає необхідність врахування елементів невизначеності, що може реалізовуватися через використання ймовірнісних моделей або введення випадкових збурень у симуляційних сценаріях [8].

У сучасних дослідженнях також приділяється значна увага впливу деградації на енергоефективність технічних систем. Зокрема, встановлено, що навіть незначні відхилення умов експлуатації можуть призводити до непропорційного зростання енергоспоживання. Це пояснюється тим, що система змушена працювати у менш оптимальних режимах, компенсуючи втрати за рахунок додаткових ресурсів. У довгостроковій перспективі це не лише знижує ефективність, але й прискорює знос обладнання [9].

Крім того, деградуючі середовища суттєво впливають на надійність технічних систем. Підвищення температури, наприклад, може прискорювати процеси старіння матеріалів, а забруднення може викликати додаткові механічні навантаження або порушення нормального режиму роботи. У результаті зростає

ймовірність відмов, причому ці відмови часто мають складний характер і не зводяться до одного конкретного фактору [10].

У контексті кіберфізичних систем проблема деградації набуває додаткового виміру. Оскільки такі системи базуються на даних, отриманих із сенсорів, зміна характеристик середовища може впливати не лише на сам об'єкт, але й на точність вимірювань. Це, у свою чергу, може призводити до некоректних рішень з боку алгоритмів керування. Таким чином, деградація впливає як на фізичну, так і на інформаційну складову системи, що ускладнює її аналіз [11].

Необхідно також відзначити, що традиційні підходи до проектування технічних систем часто базуються на припущенні про відносну стабільність середовища. У реальних умовах це припущення не завжди виконується, що обмежує ефективність таких підходів. Саме тому зростає інтерес до методів, які дозволяють враховувати змінність умов експлуатації та адаптувати роботу системи відповідно до поточного стану середовища [12].

Деградуючі середовища є важливим фактором, що визначає поведінку технічних систем у реальних умовах експлуатації. Їх вплив проявляється у зміні робочих характеристик, зниженні ефективності, зростанні енергоспоживання та підвищенні ризику відмов. Врахування цих факторів є необхідною умовою для розробки ефективних систем адаптивного керування, що, власне, і визначає актуальність подальших досліджень у даному напрямі.

1.3 Особливості роботи технічних об'єктів в умовах деградації

Функціонування технічних об'єктів у реальних умовах експлуатації рідко відповідає ідеалізованим моделям, що закладаються на етапі проектування. З часом характеристики обладнання змінюються, і ці зміни, як правило, мають накопичувальний характер. У контексті деградуючого середовища це означає, що технічний об'єкт поступово переходить від оптимального режиму роботи до

станів, у яких його ефективність знижується, а стабільність функціонування стає менш передбачуваною.

Однією з ключових особливостей роботи технічних систем в умовах деградації є зміна їхніх статичних та динамічних характеристик. Якщо на початковому етапі залежності між параметрами можуть описуватися відносно простими моделями, то з часом ці залежності ускладнюються. Наприклад, для насосів характерним є зниження коефіцієнта корисної дії, яке не завжди лінійно залежить від ступеня зносу або забруднення. У деяких випадках спостерігаються навіть порогові ефекти, коли система довгий час працює відносно стабільно, а потім різко переходить у менш ефективний режим [13].

Важливою особливістю є також зростання чутливості системи до зовнішніх збурень. У нормальних умовах незначні коливання параметрів середовища можуть практично не впливати на роботу об'єкта. Проте у стані деградації ці ж самі коливання здатні викликати значні відхилення у поведінці системи. Це пов'язано з тим, що запас стійкості системи зменшується, і вона стає більш вразливою до змін умов експлуатації [14].

Ще одним характерним аспектом є зміна режимів теплового навантаження. Підвищення температури, яке може бути як причиною, так і наслідком деградації, впливає на фізичні властивості матеріалів і робочого середовища. У результаті змінюються умови теплообміну, зростають втрати енергії, а також прискорюються процеси старіння компонентів. Для компресорів, наприклад, це може проявлятися у зниженні щільності робочого середовища та збільшенні витрат на його стиснення [15].

Крім того, у деградуючих умовах спостерігається підвищення рівня шуму та вібрацій. Ці фактори не лише ускладнюють експлуатацію обладнання, але й можуть виступати додатковими індикаторами його стану. Водночас, інтерпретація таких сигналів є нетривіальною задачею, оскільки вони часто містять як корисну інформацію, так і випадкові компоненти, пов'язані з зовнішніми впливами [16].

					КВРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Суттєвою проблемою є також зниження точності прогнозування поведінки системи. У міру деградації зростає невизначеність, пов'язана як із внутрішніми процесами, так і з зовнішніми умовами. Це ускладнює використання традиційних моделей, які зазвичай базуються на припущенні про стаціонарність параметрів. У результаті виникає необхідність застосування більш гнучких підходів, здатних адаптуватися до змін у процесі роботи [17].

Не менш важливим є питання взаємодії різних видів деградації. У реальних системах рідко спостерігається лише один фактор, що впливає на роботу об'єкта. Як правило, має місце поєднання декількох процесів, наприклад механічного зносу, термічного впливу та забруднення. Їх сумарний ефект може бути значно складнішим, ніж проста сума окремих впливів, що ускладнює аналіз і моделювання [18].

У цьому контексті важливо враховувати, що деградація впливає не лише на фізичні параметри, але й на ефективність керування. Алгоритми, розроблені для роботи у номінальних умовах, можуть втрачати свою ефективність або навіть ставати непридатними у разі суттєвих змін середовища. Це пов'язано з тим, що вони не враховують нові обмеження або змінені характеристики системи [19].

З точки зору енергоспоживання, деградація також відіграє значну роль. У більшості випадків погіршення стану системи призводить до збільшення витрат енергії на виконання тих самих функцій. Це обумовлено як зростанням витрат, так і необхідністю компенсувати зниження ефективності шляхом підвищення потужності. У довгостроковій перспективі це може мати суттєві економічні наслідки [20].

Робота технічних об'єктів у деградуючих умовах характеризується рядом особливостей, серед яких можна виділити зміну характеристик системи, зростання чутливості до збурень, підвищення невизначеності та зниження ефективності. Усе це створює передумови для застосування адаптивних підходів до керування, які дозволяють враховувати поточний стан системи та відповідним чином коригувати її роботу.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4 Існуючі методи адаптації режимів функціонування

Питання адаптації режимів функціонування технічних систем не є новим у науковій та інженерній практиці, однак у контексті кіберфізичних систем воно набуває дещо іншого змісту. Якщо раніше адаптація розглядалася переважно як допоміжний механізм корекції параметрів, то сьогодні вона фактично стає центральним елементом керування, особливо в умовах невизначеності та деградації середовища. При цьому під адаптацією доцільно розуміти не лише зміну окремих параметрів, а більш комплексний процес, який включає аналіз стану системи, прийняття рішень та їх реалізацію у динаміці.

Традиційні підходи до адаптації базуються на використанні регуляторів із зворотним зв'язком, серед яких найбільш поширеними є ПД регулятори. Вони дозволяють підтримувати задані значення параметрів за рахунок корекції керуючого впливу на основі похибки. Незважаючи на свою відносну простоту, такі методи залишаються актуальними і сьогодні, оскільки вони забезпечують достатню точність у широкому класі задач. Водночас, їх ефективність значно знижується у випадках, коли характеристики системи змінюються у часі або мають нелінійний характер [21].

У зв'язку з цим активно розвиваються методи адаптивного керування, які передбачають зміну параметрів самого регулятора в процесі роботи. Зокрема, підходи на основі само налаштовуваних регуляторів дозволяють враховувати зміну динамічних властивостей об'єкта. Такі системи здатні, принаймні частково, компенсувати вплив деградації, однак їх реалізація часто пов'язана з необхідністю оцінювання параметрів моделі в реальному часі, що ускладнює їх практичне застосування [22].

Окрему групу становлять методи, засновані на використанні моделей (Model Predictive Control, MPC). У цьому випадку керування здійснюється на основі прогнозування поведінки системи на певному горизонті часу. Такий

підхід дозволяє враховувати обмеження та оптимізувати роботу системи за заданими критеріями. Проте, як показує практика, застосування МРС потребує значних обчислювальних ресурсів, що може бути критичним для систем із жорсткими вимогами до часу реакції [23].

У контексті кіберфізичних систем значну увагу приділяють також методам, заснованим на використанні нечіткої логіки. Нечіткі регулятори дозволяють формалізувати знання експертів у вигляді правил типу якщо – то, що є особливо корисним у випадках, коли точна математична модель об'єкта відсутня або складна для побудови. При цьому такі системи добре працюють у умовах невизначеності, хоча їх налаштування може вимагати значних зусиль [24].

Ще одним перспективним напрямом є використання штучних нейронних мереж та інших методів машинного навчання. Такі підходи дозволяють будувати моделі, які здатні апроксимувати складні нелінійні залежності між параметрами системи. У задачах адаптації це відкриває можливість створення систем, які навчаються на основі попереднього досвіду та можуть покращувати свою ефективність у процесі роботи. Водночас, слід зазначити, що застосування таких методів пов'язане з необхідністю наявності великого обсягу даних, а також із проблемами інтерпретації отриманих результатів [25].

Поряд із цим, у практиці знаходять застосування евристичні методи адаптації, які базуються на використанні простих правил прийняття рішень. Хоча такі підходи можуть виглядати менш науковими порівняно з оптимізаційними або навчальними методами, вони часто демонструють достатню ефективність у конкретних задачах. Їх основною перевагою є простота реалізації та низькі вимоги до обчислювальних ресурсів, що робить їх привабливими для використання у вбудованих системах [26].

Не можна не згадати і про методи адаптації, що базуються на принципах робастного керування. Вони спрямовані на забезпечення стійкості системи за наявності невизначеностей у параметрах моделі. Такі підходи дозволяють

Усі вони спрямовані на забезпечення стабільної та ефективної роботи технічних об'єктів в умовах змінного середовища, проте їх застосування потребує врахування конкретних умов експлуатації та характеристик системи.

1.5 Дослідження сучасних підходів до моделювання кіберфізичних систем

Моделювання кіберфізичних систем на сьогодні розглядається як один із ключових інструментів їх дослідження та проєктування. І це, в цілому, логічно, оскільки реальні експерименти з технічними об'єктами можуть бути або занадто дорогими, або складними в організації, або навіть небезпечними. У цьому сенсі моделювання дозволяє, умовно кажучи, програти різні сценарії функціонування системи, не ризикуючи обладнанням і не витрачаючи зайві ресурси. Водночас, варто зазначити, що сам процес моделювання кіберфізичних систем має свої особливості, які відрізняють його від класичних підходів до моделювання технічних процесів.

Перш за все, складність полягає у необхідності одночасного врахування як фізичних, так і обчислювальних компонентів системи. Це означає, що модель повинна відображати не лише поведінку об'єкта (наприклад, зміну тиску чи температури), але й логіку обробки даних, алгоритми керування, а також взаємодію між цими рівнями. У результаті формується багаторівнева структура, де різні компоненти можуть працювати з різною швидкістю та мати різну природу опису – від диференціальних рівнянь до дискретних алгоритмів [31].

Одним із поширених підходів є використання так званого ко-моделювання (co simulation), коли різні частини системи моделюються окремо, але взаємодіють між собою під час виконання. Наприклад, фізичний процес може моделюватися за допомогою одного інструменту, тоді як алгоритм керування моделюється за допомогою іншого. Такий підхід дозволяє використовувати спеціалізовані засоби для кожного типу задач, проте створює додаткові труднощі, пов'язані із синхронізацією моделей та обміном даними між ними [32].

Іншим важливим напрямом є використання дискретно подієвих моделей, які дозволяють описувати систему як послідовність подій, що відбуваються у часі. Це особливо актуально для кіберфізичних систем, де значна частина логіки пов'язана з обробкою сигналів, прийняттям рішень та переходами між станами. У таких моделях увага зосереджується не стільки на безперервній зміні параметрів, скільки на моментах, коли відбуваються суттєві зміни у системі [33].

Поряд із цим широко застосовуються гібридні моделі, які поєднують безперервні та дискретні компоненти. Такий підхід дозволяє більш адекватно відобразити реальну поведінку кіберфізичних систем, у яких фізичні процеси зазвичай є безперервними, а керуючі дії – дискретними. Однак побудова та аналіз таких моделей є складним завданням, оскільки потребує узгодження різних типів опису та забезпечення їх коректної взаємодії [34].

У сучасних дослідженнях також активно використовуються цифрові двійники (digital twins), які представляють собою віртуальні копії фізичних об'єктів. Ідея полягає у тому, що модель постійно оновлюється на основі реальних даних, що дозволяє відстежувати стан системи та прогнозувати її поведінку. Такий підхід виглядає досить перспективним, хоча його реалізація потребує розвиненої інфраструктури збору та обробки даних [35].

Не менш важливим є застосування агентно орієнтованого моделювання, яке дозволяє розглядати систему як сукупність автономних компонентів (агентів), що взаємодіють між собою. Це особливо корисно у випадках, коли система має розподілену структуру або коли поведінка окремих елементів суттєво впливає на загальний результат. Водночас, такий підхід може призводити до значного ускладнення моделі, особливо при великій кількості агентів [36].

Окремо варто згадати методи, що базуються на використанні машинного навчання для побудови моделей. У цьому випадку модель формується не на основі фізичних законів, а шляхом аналізу даних. Це дозволяє враховувати складні залежності, які важко описати аналітично. Проте такі моделі часто мають

обмежену інтерпретованість і можуть погано працювати за межами навчальних вибірок [37].

У практичних задачах досить часто застосовуються спрощені моделі, які не претендують на повну точність, але дозволяють отримати достатньо адекватні результати при менших витратах ресурсів. Це особливо актуально для симуляцій, де важливим є баланс між точністю та швидкістю виконання. У таких випадках модель може включати лише ключові параметри та залежності, ігноруючи другорядні ефекти [38].

Слід також зазначити, що вибір підходу до моделювання значною мірою залежить від поставленої задачі. Якщо метою є детальний аналіз фізичних процесів, доцільно використовувати більш точні та складні моделі. Якщо ж акцент робиться на розробці алгоритмів керування або оцінці загальної поведінки системи, можуть бути достатніми спрощені або евристичні моделі [39].

Сучасні підходи до моделювання кіберфізичних систем охоплюють широкий спектр методів, кожен із яких має свої переваги та обмеження. Вибір конкретного підходу визначається особливостями системи, доступними ресурсами та цілями дослідження. У контексті даної роботи доцільним є використання симуляційної моделі, яка дозволяє поєднати відносну простоту реалізації з можливістю аналізу поведінки системи у різних умовах.

1.6 Постановка задачі дослідження

Проведено дослідження предметної області, а також розгляд особливостей функціонування технічних об'єктів у деградуючих середовищах дозволяє сформулювати основну проблему, яка потребує вирішення у межах даної роботи. Якщо узагальнити, йдеться про необхідність забезпечення стабільної та ефективної роботи технічного об'єкта в умовах, що змінюються у часі та не завжди можуть бути точно передбачені.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У традиційних підходах до керування технічними системами, як правило, передбачається, що умови експлуатації є відносно сталими або змінюються у вузьких межах. У реальних же умовах ця передумова часто не виконується. Параметри середовища можуть змінюватися поступово, іноді хаотично, а іноді у вигляді певних тенденцій, які не завжди одразу помітні. У результаті система, налаштована на номінальний режим, починає працювати менш ефективно, що проявляється у зростанні енергоспоживання, зниженні продуктивності або навіть виникненні нестабільних режимів.

Додаткову складність створює те, що вплив деградації не є миттєвим. Він накопичується з часом, і система може досить довго функціонувати у стані, який формально ще не є критичним, але вже далекий від оптимального. У таких умовах постає питання: яким чином визначити момент, коли необхідно втручання, і як саме це втручання має виглядати. Іншими словами, мова йде не лише про реакцію на відхилення, а про здатність системи адаптуватися до змін ще до того, як вони призведуть до суттєвих негативних наслідків.

У цьому контексті доцільно розглядати технічний об'єкт не як ізольовану систему, а як складову кіберфізичної структури, у якій фізичні процеси тісно пов'язані з алгоритмами обробки даних та керування. Це дозволяє формалізувати задачу адаптації у вигляді задачі прийняття рішень на основі поточного стану системи та прогнозу її поведінки.

Таким чином, основна задача дослідження полягає у розробці моделі та програмної реалізації кіберфізичної системи, яка забезпечує адаптацію режимів функціонування технічного об'єкта в умовах деградуючого середовища. При цьому під адаптацією розуміється зміна керуючих параметрів з метою підтримання заданих характеристик системи або, принаймні, запобігання їх критичному погіршенню.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити ряд підзадач, які, у певному сенсі, логічно впливають одна з одної:

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- сформулювати узагальнену модель технічного об'єкта, яка відображає основні залежності між його параметрами;
- описати вплив деградуючих факторів середовища на ці параметри;
- розробити алгоритм адаптивного керування, який враховує поточний стан системи;
- реалізувати симуляційну модель, що дозволяє досліджувати поведінку системи у різних умовах;
- розробити апаратну частину системи на базі ESP32 для імітації впливу деградуючого середовища;
- провести експериментальне дослідження ефективності запропонованого підходу.

Окремо слід зазначити, що у межах даної роботи не ставиться задача побудови максимально точної фізичної моделі об'єкта. Натомість акцент робиться на створенні такої моделі, яка є достатньо простою для реалізації, але водночас дозволяє відобразити ключові ефекти, пов'язані з деградацією та адаптацією. Це, з одного боку, спрощує процес розробки, а з іншого боку робить результати більш наочними та придатними для аналізу.

Також варто підкреслити, що запропонований підхід орієнтований на симуляційне дослідження, тобто всі експерименти проводяться у віртуальному середовищі. Це дозволяє варіювати параметри системи у широкому діапазоні, включаючи ті значення, які було б складно або небезпечно відтворити у реальних умовах.

У підсумку, постановка задачі зводиться до створення такої моделі та програмної реалізації, які дозволяють дослідити, наскільки ефективно адаптивні алгоритми можуть компенсувати вплив деградуючого середовища та забезпечувати прийнятний рівень функціонування технічного об'єкта. При цьому очікується, що отримані результати дадуть змогу зробити висновки щодо доцільності використання подібних підходів у практичних системах.

Важливою вимогою є також стабільність роботи системи. Алгоритм адаптації не повинен призводити до різких або хаотичних змін параметрів, які можуть зробити поведінку системи непрогнозованою. Навпаки, бажано, щоб зміни відбувалися плавно, навіть якщо це означає деяку втрату швидкості реакції. У певному сенсі, тут доводиться шукати компроміс між швидкістю адаптації та її стійкістю.

Окремо слід виділити вимоги до гнучкості системи. Користувач повинен мати можливість змінювати основні параметри симуляції: початковий стан об'єкта, рівень деградації, цільові значення продуктивності тощо. Це дозволяє досліджувати різні сценарії та оцінювати, як система поводить у різних умовах. Без такої можливості симуляція втрачає значну частину своєї практичної цінності.

Також доцільно передбачити апаратну частину, яка дозволяє продемонструвати принцип роботи кіберфізичної системи на базі мікроконтролера. Апаратний вузол повинен забезпечувати зчитування вхідних параметрів, імітацію впливу деградуючого середовища та виведення результатів роботи системи для подальшого дослідження.

Не менш важливим є питання візуалізації результатів. Система повинна надавати зручні засоби для відображення змін параметрів у часі, зокрема у вигляді графіків. Це дозволяє не лише аналізувати результати, але й робить їх більш наочними, що особливо важливо у контексті демонстрації роботи системи. Бажано, щоб була можливість порівнювати різні режими роботи, наприклад, із адаптацією та без неї.

Ще однією вимогою є модульність структури програмного забезпечення. Основні компоненти це модель об'єкта, модель середовища, алгоритм керування, модуль симуляції, які повинні бути відносно незалежними один від одного. Це спрощує як розробку, так і подальшу модифікацію системи. Крім того, така структура дозволяє при необхідності замінювати окремі компоненти без повної переробки всієї системи.

Слід також враховувати вимоги до продуктивності. Оскільки симуляція передбачає виконання великої кількості ітерацій, система повинна працювати достатньо швидко, щоб забезпечити прийнятний час виконання експериментів. При цьому надмірна оптимізація не є пріоритетом, оскільки основною метою є дослідження поведінки системи, а не досягнення максимальної швидкодії.

Нарешті, важливою є вимога до інтерпретованості результатів. Користувач повинен мати можливість зрозуміти, чому система поводить себе саме так, а не інакше. Це означає, що логіка алгоритму адаптації має бути прозорою, а результати мають бути пояснюваними. У протилежному випадку система може виглядати як чорний ящик, що ускладнює її аналіз і знижує довіру до отриманих результатів.

Вимоги до системи адаптації режимів функціонування формуються як компроміс між точністю, складністю та практичною доцільністю. Система повинна бути достатньо простою для реалізації, але водночас дозволяти відобразити ключові аспекти взаємодії технічного об'єкта з деградуючим середовищем та оцінити ефективність адаптивного керування.

1.8 Висновок до першого розділу

У першому розділі було проведено аналіз предметної області кіберфізичних систем та особливостей їх функціонування у деградуючих середовищах. Розглянуто поняття кіберфізичних систем, визначено їх основні складові та роль у сучасних технічних об'єктах.

Проаналізовано вплив деградуючих факторів на роботу технічних систем. Визначено, що деградація середовища призводить до зміни робочих характеристик об'єкта, зростання енергоспоживання, підвищення невизначеності та ризику виникнення нестабільних режимів роботи.

Також було розглянуто особливості функціонування технічних об'єктів в умовах деградації та сучасні методи адаптації режимів роботи, зокрема ПД-

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювання, адаптивне керування, МРС, нечітку логіку, нейронні мережі та гібридні підходи. Аналіз існуючих методів показав, що універсального підходу до адаптації не існує, а вибір методу залежить від характеристик системи та умов її експлуатації.

У ході дослідження проаналізовано сучасні підходи до моделювання кіберфізичних систем, включаючи ко-моделювання, гібридні моделі, цифрові двійники та симуляційні підходи. Визначено, що для задач даної роботи доцільним є використання симуляційної моделі, яка дозволяє поєднати простоту реалізації з можливістю аналізу поведінки системи у різних умовах.

Отримані результати створюють теоретичну основу для подальшого проектування та програмно-апаратної реалізації кіберфізичної системи адаптивного керування технічним об'єктом у деградуючому середовищі.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Формалізація задачі адаптації режимів роботи

Після визначення загальної постановки задачі доцільно перейти до її формалізації, тобто представлення у вигляді, придатному для подальшого моделювання та програмно-апаратної реалізації. При цьому слід враховувати, що надмірна математична складність у даному випадку не є самоціллю. Навпаки, важливо отримати таку формалізацію, яка з одного боку відображає ключові особливості системи, а з іншого залишається зрозумілою і придатною для реалізації у вигляді симуляції.

У загальному вигляді технічний об'єкт можна розглядати як динамічну систему, стан якої описується набором параметрів, що змінюються у часі. До таких параметрів у межах даної роботи відносяться температура, тиск, продуктивність та енергоспоживання. Формально це можна представити як вектор стану, значення якого на кожному кроці часу визначаються попереднім станом, зовнішніми впливами та керуючими діями.

Важливою складовою формалізації є введення часової дискретизації. Замість безперервного часу доцільно використовувати дискретні кроки, що значно спрощує реалізацію моделі. На кожному такому кроці система переходить з одного стану в інший, причому цей перехід визначається певними функціями або правилами. Такий підхід не є абсолютно точним з фізичної точки зору, але дозволяє достатньо адекватно описати поведінку системи у рамках симуляції.

Окремо необхідно формалізувати вплив деградуючого середовища. Для цього вводиться набір параметрів, які характеризують стан середовища, наприклад рівень деградації або температура оточення. Ці параметри також змінюються у часі, причому їх зміна може мати як детермінований, так і

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випадковий характер. Важливо, що вони впливають на зміну стану технічного об'єкта, змінюючи його характеристики або ефективність.

Наступним кроком є формалізація керуючих впливів. Керування у даній системі полягає у зміні певних параметрів роботи об'єкта, наприклад рівня потужності або швидкості обертання. Формально це можна представити як набір керуючих змінних, значення яких визначаються алгоритмом адаптації на основі поточного стану системи. Таким чином, керування є функцією від стану об'єкта та, можливо, від стану середовища.

У цьому контексті задача адаптації може бути сформульована як задача вибору керуючих впливів, які забезпечують досягнення певної мети. Ця мета може бути задана у вигляді критеріїв, наприклад підтримання продуктивності на заданому рівні або обмеження температури у допустимих межах. У більш загальному випадку можна говорити про оптимізацію деякої функції, яка враховує декілька параметрів одночасно, хоча у рамках даної роботи доцільно використовувати більш прості підходи.

Слід також врахувати обмеження, які накладаються на систему. Це можуть бути фізичні обмеження (наприклад, максимальна температура або тиск), а також обмеження, пов'язані з самим процесом керування (інерційність системи, обмеження швидкості зміни параметрів). У формалізованому вигляді ці обмеження задають допустиму область значень для параметрів системи та керуючих впливів.

Таким чином, формалізована задача може бути описана як процес, у якому на кожному кроці часу:

- визначається поточний стан технічного об'єкта;
- враховується вплив середовища;
- обчислюється керуючий вплив на основі заданого алгоритму;
- виконується перехід системи до нового стану.

При цьому важливо підкреслити, що у межах даної роботи акцент робиться не на точному математичному розв'язанні задачі оптимізації, а на побудові такої

					КВРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

моделі, яка дозволяє дослідити загальні закономірності поведінки системи. Іншими словами, формалізація має бути достатньо простою, щоб її можна було реалізувати програмно, але водночас достатньо змістовною, щоб отримані результати мали практичну цінність.

2.2 Побудова математичної моделі технічного об'єкта

Побудова математичної моделі технічного об'єкта є, по суті, одним із ключових етапів роботи, хоча в рамках даного дослідження вона не має на меті досягнення максимальної фізичної точності. Скоріше, мова йде про формування узагальненої моделі, яка дозволяє відобразити основні закономірності поведінки системи та її реакцію на зміну умов середовища.

Стан технічного об'єкта у момент часу t описується набором параметрів, серед яких основними є температура, тиск, продуктивність та енергоспоживання. Формально це можна подати у вигляді вектора стану:

$$X(t) = [T(t), P(t), Q(t), E(t)], \quad (2.1)$$

де $X(t)$ - вектор стану технічного об'єкта у момент часу t ;

$T(t)$ - температура технічного об'єкта у момент часу t ;

$P(t)$ - тиск у системі у момент часу t ;

$Q(t)$ - продуктивність технічного об'єкта у момент часу t ;

$E(t)$ - енергоспоживання технічного об'єкта у момент часу t ;

t - поточний момент часу.

$$X(t + 1) = f(x(t), U(t), D(t)), \quad (2.2)$$

де $X(t + 1)$ - вектор стану технічного об'єкта на наступному кроці часу;

$X(t)$ - вектор стану технічного об'єкта у поточний момент часу;

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

f - функція переходу системи між станами;

$U(t)$ - керуючий вплив на технічний об'єкт у момент часу t ;

$D(t)$ - параметр, що описує вплив зовнішнього середовища або рівень деградації технічного об'єкта;

t - поточний момент часу.

Продуктивність технічного об'єкта можна задати як функцію від керування та ефективності:

$$Q(t) = k_1 \cdot U(t) \cdot \eta(t), \quad (2.3)$$

де $Q(t)$ - продуктивність технічного об'єкта у момент часу t ;

k_1 - коефіцієнт пропорційності, що визначає вплив керуючої дії на продуктивність;

$U(t)$ - керуючий вплив на технічний об'єкт у момент часу t ;

$\eta(t)$ - коефіцієнт ефективності технічного об'єкта у момент часу t , який зменшується зі зростанням деградації;

t - поточний момент часу.

Енергоспоживання у спрощеному вигляді залежить від навантаження та внутрішніх втрат:

$$E(t) = k_2 \cdot U(t)^2 + L(t), \quad (2.4)$$

де $E(t)$ - енергоспоживання технічного об'єкта у момент часу t ;

k_2 - коефіцієнт пропорційності, що визначає залежність енергоспоживання від рівня керуючого впливу;

$U(t)$ - керуючий вплив на технічний об'єкт у момент часу t ;

$L(t)$ - внутрішні втрати енергії у технічному об'єкті у момент часу t ;

t - поточний момент часу.

Температурний режим описується через баланс між нагрівом і охолодженням:

$$T(t + 1) = T(t) + \alpha \cdot E(t) - \beta \cdot (T(t) - T_{env}), \quad (2.5)$$

де $T(t + 1)$ - температура технічного об'єкта на наступному кроці часу;

$T(t)$ - температура технічного об'єкта у поточний момент часу;

α - коефіцієнт впливу енергоспоживання на нагрів технічного об'єкта;

$E(t)$ - енергоспоживання технічного об'єкта у момент часу t ;

β - коефіцієнт охолодження технічного об'єкта;

T_{env} - температура зовнішнього середовища;

t - поточний момент часу.

Тиск у системі можна подати як залежність від продуктивності та опору:

$$P(t) = k_3 \cdot Q(t) - R(t), \quad (2.6)$$

де $P(t)$ - тиск у системі у момент часу t ;

k_3 - коефіцієнт пропорційності, що визначає вплив продуктивності на тиск у системі;

$Q(t)$ - продуктивність технічного об'єкта у момент часу t ;

$R(t)$ - опір або втрати тиску в системі у момент часу t ;

t - поточний момент часу.

Окремо вводиться змінна деградації, яка зростає у часі:

$$D(t + 1) = D(t) + \delta + \epsilon(t), \quad (2.7)$$

де $D(t + 1)$ - рівень деградації технічного об'єкта на наступному кроці часу;

$D(t)$ - рівень деградації технічного об'єкта у поточний момент часу;

δ - постійна складова приросту деградації за один крок часу;

$\varepsilon(t)$ - випадкова або зовнішня складова зміни деградації у момент часу t ;
 t - поточний момент часу.

У підсумку отримана модель дозволяє описати зміну стану технічного об'єкта у дискретному часі з урахуванням керуючих впливів та деградуючого середовища. Вона не є строго фізичною у класичному сенсі, однак достатньо добре відображає ключові взаємозв'язки між параметрами системи, що робить її придатною для подальшого використання у програмній симуляції та апаратній частині системи.

2.3 Моделювання деградуючих факторів середовища

Після формалізації задачі та побудови базової моделі технічного об'єкта виникає необхідність більш детального розгляду деградуючих факторів середовища, оскільки саме вони створюють ті умови, у яких система повинна функціонувати. У межах даної роботи деградація розглядається не як одиничне відхилення або випадковий збій, а як процес, що розгортається у часі та має накопичувальний характер. Це, на перший погляд, очевидне уточнення, але воно суттєво впливає на побудову моделі та подальший аналіз результатів.

У реальних умовах експлуатації технічних систем деградація зазвичай не має однієї конкретної причини. Як правило, це поєднання декількох факторів, які можуть діяти паралельно або послідовно. При цьому їх вплив не завжди є рівномірним або передбачуваним. Саме тому при моделюванні доцільно відійти від спроби точно відтворити кожен окремий процес і зосередитись на відображенні загальних тенденцій. Іншими словами, модель повинна бути достатньо простою, щоб її можна було реалізувати, але водночас достатньо змістовною, щоб результати не виглядали відірваними від реальності.

У запропонованій моделі деградація описується через узагальнений показник, який змінюється у часі. Його значення поступово зростає, що відображає накопичення негативних ефектів. Разом із цим у модель вводиться

елемент випадковості, який дозволяє уникнути надмірно ідеальної поведінки системи. У результаті деградація набуває характеру процесу, який має як визначену тенденцію, так і певну нерівномірність. Такий підхід, хоча і спрощений, дозволяє отримати більш реалістичну картину.

Одним із основних факторів, що враховуються у моделі, є температурний вплив середовища. Підвищення температури розглядається як поступовий процес, який може супроводжуватись короткочасними коливаннями. Це важливо, оскільки температура впливає практично на всі інші параметри системи від ефективності до рівня втрат. У певному сенсі, її можна розглядати як один із базових індикаторів деградації.

Іншим суттєвим фактором є зниження ефективності технічного об'єкта. У моделі це проявляється у тому, що при однакових керуючих впливах система поступово починає працювати гірше. Наприклад, для досягнення тієї ж продуктивності необхідно збільшувати потужність. Така поведінка є досить типовою для реальних систем, де знос або забруднення призводять до зниження корисної дії. Водночас, у моделі цей ефект подається у спрощеному вигляді, без детального врахування фізичних причин.

Окремо враховується фактор зростання внутрішніх втрат. Він може бути пов'язаний із тертям, забрудненням, порушенням геометрії елементів або іншими процесами. У моделі це відображається як додаткове навантаження, яке збільшується у часі. При цьому важливо, що ці втрати не є сталими, а змінюються разом із рівнем деградації, що робить поведінку системи більш динамічною.

Ще одним компонентом є збільшення опору середовища. Для систем, пов'язаних із переміщенням рідин або газів, це може означати, наприклад, засмічення каналів або зміну властивостей робочого середовища. У моделі цей фактор впливає на результативність роботи, зменшуючи ефект від керуючих впливів. Іншими словами, система змушена працювати більше, щоб отримати той самий результат.

					КВРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Суттєвою особливістю є взаємозв'язок між усіма переліченими факторами. Наприклад, підвищення температури може призводити до збільшення втрат, а зростання втрат призводить до ще більшого нагрівання. У результаті формується своєрідний замкнений цикл, у якому деградація підсилює сама себе. Це не є строгою фізичною моделлю, але добре ілюструє загальну тенденцію, яка спостерігається у реальних системах.

Крім того, у моделі передбачено можливість зміни інтенсивності деградації. Це дозволяє досліджувати різні сценарії функціонування системи, від відносно стабільних умов до ситуацій, коли деградація розвивається швидко. Така можливість є важливою для аналізу ефективності алгоритмів адаптації, оскільки дозволяє оцінити їх поведінку у різних умовах.

Слід також зазначити, що модель не намагається врахувати всі можливі фактори, які можуть впливати на систему. Зокрема, не розглядаються детально хімічні процеси, складні термодинамічні ефекти або специфічні особливості конструкції обладнання. Це зроблено свідомо, оскільки включення всіх цих аспектів значно ускладнило б модель, не даючи пропорційного виграшу у межах поставленої задачі.

У певному сенсі, запропонований підхід можна розглядати як компроміс між точністю та зручністю використання. Він дозволяє відобразити основні ефекти деградації, не перевантажуючи модель зайвими деталями. При цьому отримані результати залишаються достатньо наочними, що є важливим для подальшого аналізу.

Модель деградуючих факторів середовища у даній роботі виконує дві основні функції. З одного боку, вона створює умови, у яких функціонує технічний об'єкт, а з іншого боку формує основу для перевірки ефективності алгоритмів адаптації. Саме через взаємодію з цією моделлю стає можливим оцінити, наскільки система здатна компенсувати негативні впливи та підтримувати прийнятний рівень функціонування.

2.4 Розробка алгоритму адаптації режимів функціонування

Після побудови моделі технічного об'єкта та опису деградуючих факторів середовища логічним наступним кроком є розробка алгоритму адаптації режимів функціонування. Саме цей елемент визначає, яким чином система реагує на зміни стану та чи здатна вона компенсувати негативний вплив деградації. У певному сенсі, можна сказати, що без адаптації вся попередня модель залишається лише засобом спостереження, тоді як із адаптацією вона перетворюється на інструмент керування.

У межах даної роботи не ставиться задача розробки складного оптимізаційного алгоритму або використання методів машинного навчання. Навпаки, обрано практичний підхід, заснований на використанні простих евристичних правил. Це дозволяє спростити реалізацію та зробити поведінку системи більш зрозумілою й інтерпретованою. Такий підхід не є універсальним, але цілком виправданий для задачі симуляційного дослідження.

Алгоритм адаптації базується на аналізі поточного стану технічного об'єкта та прийнятті рішень щодо зміни керуючих параметрів. Основна ідея полягає у тому, що система постійно відстежує ключові показники: температуру, тиск, продуктивність та енергоспоживання, і порівнює їх із заданими або допустимими значеннями. У випадку виявлення відхилень формуються керуючі дії, спрямовані на їх корекцію.

Одним із центральних елементів алгоритму є використання порогових значень. Для кожного параметра задається певний діапазон, у межах якого його значення вважається допустимим. Якщо параметр виходить за ці межі, алгоритм реагує відповідним чином. Наприклад, у випадку перевищення температури може зменшуватися рівень навантаження, тоді як при зниженні продуктивності навпаки, збільшуватися.

Разом із тим, алгоритм не обмежується жорсткими умовами типу перевищено зменшити. У ньому також враховується динаміка зміни параметрів.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це означає, що система реагує не лише на поточне значення, але й на тенденцію його зміни. Наприклад, якщо температура зростає швидко, навіть перебуваючи у допустимому діапазоні, алгоритм може заздалегідь зменшити навантаження, щоб уникнути подальшого погіршення ситуації.

Ще одним важливим аспектом є узгодження різних цілей керування. У даній системі існує декілька критеріїв, які не завжди сумісні між собою. З одного боку, необхідно підтримувати продуктивність, з іншого боку треба обмежувати температуру та енергоспоживання. У результаті виникає ситуація, коли покращення одного показника може призводити до погіршення іншого. Алгоритм вирішує цю проблему шляхом введення пріоритетів, де, наприклад, безпека (у вигляді обмеження температури) має вищий пріоритет, ніж максимізація продуктивності.

Слід також врахувати, що різкі зміни керуючих параметрів можуть негативно впливати на стабільність системи. Тому в алгоритмі передбачено обмеження на швидкість зміни керування. Це означає, що навіть у разі значного відхилення параметрів зміни відбуваються поступово. Такий підхід дозволяє уникнути коливань та забезпечує більш плавну поведінку системи.

Окремо варто відзначити, що алгоритм адаптації працює у циклічному режимі. На кожному кроці симуляції він отримує актуальні дані про стан системи, аналізує їх та формує нові керуючі дії. Таким чином забезпечується постійний зворотний зв'язок, який є необхідною умовою адаптивного керування. При цьому затримка між вимірюванням і реакцією вважається мінімальною, що відповідає умовам симуляційного моделювання.

У певному сенсі, запропонований алгоритм можна охарактеризувати як правило орієнтований. Його поведінка визначається набором умов та відповідних дій. Такий підхід має як переваги, так і обмеження. З одного боку, він простий у реалізації та добре піддається аналізу. З іншого боку він може бути менш ефективним у складних або нетипових ситуаціях. Проте для задачі, що розглядається у даній роботі, цього рівня складності є достатньо.

Важливо також підкреслити, що алгоритм адаптації розробляється не ізольовано, а у тісному зв'язку з моделлю системи. Його параметри та правила налаштовуються таким чином, щоб забезпечити помітний ефект у межах симуляції. Це означає, що алгоритм є, певною мірою, підігнаним під модель, що є допустимим у рамках дослідницької роботи.

У підсумку, розроблений алгоритм адаптації дозволяє системі змінювати режими функціонування у відповідь на деградацію середовища. Він не є оптимальним у строгому математичному сенсі, але забезпечує стабілізацію ключових параметрів та може бути використаний у подальшій програмно-апаратній реалізації системи.

2.5 Проектування архітектури кіберфізичної системи

Після визначення загальних принципів моделювання та розробки алгоритму адаптації наступним логічним етапом є формування архітектури системи. На цьому рівні відбувається узгодження окремих компонентів у єдину структуру, яка забезпечує їх спільне функціонування. При цьому важливо не лише визначити склад елементів, але й зрозуміти, як саме вони взаємодіють між собою, оскільки навіть відносно прості модулі при невдалому поєднанні можуть давати нестабільну або важко прогнозовану поведінку.

У загальному вигляді архітектура розробленої кіберфізичної системи включає програмну та апаратну частини. Програмна частина містить модель технічного об'єкта, модель середовища, модуль адаптивного керування та симуляційний модуль. Апаратна частина на базі ESP32 призначена для зчитування вхідних параметрів, імітації впливу деградуючого середовища та виведення результатів роботи системи. Такий поділ дозволяє поєднати симуляційне дослідження з демонстрацією роботи окремого апаратного вузла.

Модель технічного об'єкта виконує роль центрального елемента, у якому відображається зміна стану системи у часі. Вона отримує на вході керуючі

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впливи та параметри середовища, після чого формує новий стан об'єкта. При цьому важливо, що модель не є ізольованою, її поведінка безпосередньо залежить від інших компонентів системи.

Модель середовища, у свою чергу, формує ті умови, у яких працює технічний об'єкт. Саме в ній реалізовано механізм деградації, що поступово змінює характеристики системи. Важливо, що ця підсистема працює паралельно з моделлю об'єкта і впливає на неї на кожному кроці симуляції. Такий підхід дозволяє відобразити динамічний характер зовнішніх впливів.

Модуль адаптивного керування виконує функцію аналізу та прийняття рішень. Він отримує інформацію про поточний стан системи та на її основі формує керуючі дії. У певному сенсі, цей модуль можна розглядати як інтелектуальну частину системи, хоча його логіка у даній роботі є відносно простою. Важливо, що він не втручається безпосередньо у внутрішні процеси моделі об'єкта, а працює через зміну керуючих параметрів.

Симуляційний модуль забезпечує координацію роботи всіх компонентів. Він визначає порядок виконання операцій, організовує часові кроки та забезпечує передачу даних між підсистемами. Фактично, цей модуль реалізує загальний цикл роботи системи, у межах якого відбувається послідовне оновлення стану середовища, об'єкта та керування.

Програмна та апаратна частини у запропонованій архітектурі виконують різні функції, але працюють у межах єдиної логіки адаптивного керування. Програмна частина відповідає за симуляцію, а апаратна частина забезпечує зчитування й обробку вхідних параметрів.

Такий поділ дозволяє поєднати програмну симуляцію з практичною демонстрацією роботи окремого апаратного вузла. Завдяки цьому архітектура системи краще відображає особливості кіберфізичної системи адаптації режимів функціонування технічного об'єкта.

На рисунку 2.1 наведено структуру програмно-апаратної кіберфізичної системи, яка включає програмну та апаратну частини.

Також слід враховувати, що архітектура повинна забезпечувати можливість масштабування. Хоча у межах даної роботи розглядається відносно проста система, запропонована структура дозволяє у майбутньому додавати нові компоненти або розширювати існуючі. Це може бути, наприклад, введення додаткових параметрів або ускладнення алгоритму керування.

2.6 Опис інформаційних потоків та взаємодії компонентів

Після визначення загальної архітектури системи доцільно більш детально розглянути інформаційні потоки між її компонентами, оскільки саме через них реалізується фактична взаємодія. У певному сенсі, якщо архітектура задає що є у системі, то інформаційні потоки відповідають на питання як це працює разом. І тут, як показує практика, саме деталі взаємодії часто визначають, чи буде система поводитися стабільно, чи почне давати дивні результати.

У межах розроблюваної кіберфізичної системи можна виділити інформаційні потоки програмної та апаратної частин, які забезпечують узгоджену роботу всіх компонентів. У програмній частині основними є потоки даних про стан технічного об'єкта. Вони включають значення температури, тиску, продуктивності та енергоспоживання, які формуються моделлю об'єкта на кожному кроці симуляції. Ці дані передаються до модуля адаптивного керування, а також використовуються для подальшого відображення результатів у графічному інтерфейсі користувача.

Другим важливим типом є потоки, що описують стан середовища. Вони включають параметри деградації, температуру оточення та інші фактори, які впливають на роботу технічного об'єкта. Ці дані формуються у моделі середовища і передаються до моделі технічного об'єкта, змінюючи її поведінку у процесі симуляції. Завдяки цьому програмна частина системи може відображати не лише стабільний режим роботи, але й поступове погіршення умов функціонування.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В апаратній частині інформаційні потоки формуються від вхідних елементів до мікроконтролера ESP32. Вхідні сигнали використовуються для імітації параметрів середовища та рівня деградації. Після обробки цих даних мікроконтролер визначає поточний режим роботи системи та виводить результати для подальшого спостереження.

Третім ключовим потоком є керуючі впливи, які формуються модулем адаптивного керування. У програмній частині вони передаються до моделі об'єкта, а в апаратній частині реалізуються у вигляді логіки визначення режиму роботи. При цьому керування базується на аналізі поточного стану, що створює замкнений контур взаємодії.

Окремо слід виділити потоки, пов'язані із симуляційним модулем. Він координує виконання програмної частини, забезпечує послідовність переходу між кроками симуляції та передавання даних між компонентами. У результаті вся взаємодія компонентів відбувається у межах циклічного процесу, що повторюється на кожному кроці роботи системи.

На рисунку 2.2 наведено підключення компонентів апаратної частини системи, що забезпечує зчитування вхідних параметрів, їх обробку та виведення результатів.

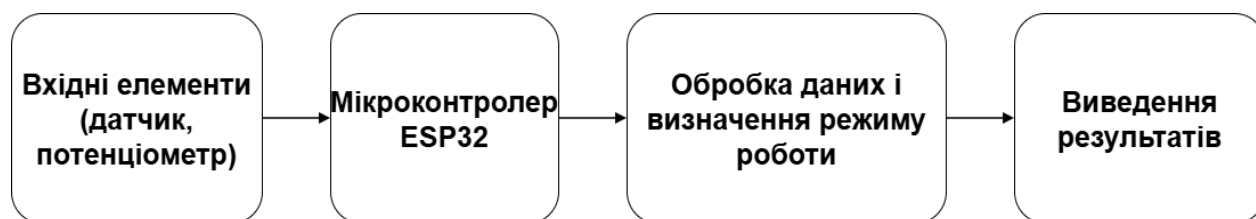


Рисунок 2.2 – Підключення компонентів апаратної частини системи

Наведене підключення відображає принцип взаємодії вхідних елементів з мікроконтролером ESP32. Дані, що надходять на вхід апаратного вузла, обробляються програмою мікроконтролера, після чого система визначає поточний режим роботи та виводить результати для подальшого спостереження.

Слід також звернути увагу на часову узгодженість потоків у програмній частині системи. Усі компоненти працюють у межах єдиного дискретного часу, що спрощує синхронізацію. Це означає, що на кожному кроці всі необхідні дані є доступними, і не виникає ситуацій, коли один модуль працює з застарілою інформацією. Такий підхід є спрощенням, але він цілком виправданий у контексті симуляційної моделі.

Ще одним важливим аспектом є відсутність прямих залежностей між деякими компонентами. Наприклад, модуль керування не взаємодіє безпосередньо із середовищем, а отримує інформацію лише через стан об'єкта. Це дозволяє зменшити складність системи та зробити її більш модульною. Водночас, це означає, що частина інформації може бути втрачена або спотворена, що є певним компромісом.

2.7 Вибір технологій реалізації

Після визначення загальної структури системи та принципів її функціонування необхідно обґрунтувати вибір технологій, що використовуються для реалізації. Даний етап не є формальністю, оскільки саме від нього залежить не лише зручність розробки, але й подальша працездатність, розширюваність та наочність системи. У межах цієї роботи технологічний стек підбирався з урахуванням практичності, доступності та відповідності поставленим задачам.

У якості основної мови програмування було обрано C#. Вона забезпечує достатній рівень абстракції, дозволяючи працювати з об'єктами та логічними структурами без надмірного заглиблення у низькорівневі деталі [40]. Крім того, мова має добре розвинуту екосистему та підтримує сучасні підходи до програмування, включаючи асинхронність та об'єктно-орієнтовану модель [41]. Важливим фактором є також її інтеграція з платформою .NET, яка забезпечує доступ до широкого набору бібліотек [42].

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Платформа .NET виступає основою для виконання програмного забезпечення, забезпечуючи управління пам'яттю, обробку виключень та виконання коду у керованому середовищі [43]. Це дозволяє підвищити стабільність системи та спростити процес розробки. Крім того, платформа підтримує багатопотоковість та асинхронні операції, що є важливим для реалізації симуляційних процесів [44].

Для створення графічного інтерфейсу користувача використано технологію WPF. Вона дозволяє формувати інтерфейс за допомогою декларативного підходу, що спрощує розробку та підвищує гнучкість системи [45]. Використання XAML дозволяє відокремити логіку від представлення, що позитивно впливає на структуру програми [46]. Додатково, WPF підтримує сучасні механізми роботи з графікою, що є важливим для відображення результатів симуляції [47].

Однією з ключових переваг WPF є механізм прив'язки даних. Він дозволяє автоматично оновлювати елементи інтерфейсу при зміні значень у моделі, що особливо важливо у задачах, пов'язаних із динамічними даними [48]. Завдяки цьому значно зменшується обсяг допоміжного коду, необхідного для синхронізації стану системи та її відображення.

У якості архітектурного підходу використано шаблон MVVM, який дозволяє розділити систему на логічні компоненти: модель, представлення та проміжний рівень керування [49]. Це забезпечує кращу організацію коду та спрощує його модифікацію. Додатково, використання архітектурних патернів у цілому сприяє підвищенню якості програмного забезпечення [50].

Для організації симуляційного процесу використано стандартні механізми мови C#, зокрема циклічну обробку та асинхронні виклики. Це дозволяє реалізувати покрокове оновлення системи без блокування інтерфейсу [51]. Такий підхід є достатнім для задачі моделювання і не потребує використання спеціалізованих інструментів.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Візуалізація результатів реалізується за допомогою бібліотеки побудови графіків LiveCharts. Вона дозволяє відображати зміну параметрів у часі та підтримує оновлення даних у реальному часі [52]. Це значно підвищує наочність результатів і полегшує їх дослідження.

Організація збереження даних у межах даної роботи реалізована у спрощеному вигляді. Дані зберігаються у пам'яті або експортуються у текстові файли, що дозволяє уникнути використання складних систем керування базами даних [53]. Такий підхід є достатнім для проведення експериментів і не створює зайвої складності.

Важливу роль відіграє також середовище розробки. Використання Visual Studio дозволяє застосовувати інструменти налагодження, аналізу продуктивності та тестування, що значно спрощує процес створення програмного забезпечення [54].

Для реалізації апаратної частини системи використано мікроконтролер ESP32. Його застосування дозволяє організувати зчитування вхідних параметрів, виконати їх первинну обробку та сформувати результат у вигляді поточного режиму роботи технічного об'єкта. У межах даної роботи ESP32 використовується як апаратний вузол кіберфізичної системи, що демонструє принцип взаємодії вхідних елементів з обчислювальним модулем.

Програма для мікроконтролера реалізована засобами Arduino. Такий підхід є доцільним, оскільки Arduino-середовище дозволяє створювати програму для зчитування сигналів, обробки отриманих значень та виведення результатів роботи системи. У якості засобу відображення результатів використовується Serial Monitor, через який можна спостерігати зміну параметрів, рівень деградації та визначений режим роботи.

Таким чином, обраний стек технологій є результатом компромісу між функціональністю, складністю та практичною доцільністю. Він дозволяє реалізувати програмну симуляцію з графічним інтерфейсом користувача та

апаратну частину системи на базі мікроконтролера, що робить розробку придатною для проведення симуляційних і практичних досліджень.

2.8 Розробка моделі симуляції роботи системи

Після визначення архітектури системи, опису інформаційних потоків та вибору технологій реалізації логічним завершенням етапу проєктування є розробка моделі симуляції. Саме на цьому рівні всі попередні напрацювання об'єднуються у цілісну систему, яка дозволяє відтворити поведінку технічного об'єкта в умовах деградуючого середовища. При цьому модель не претендує на абсолютну фізичну точність, а скоріше виступає як інструмент аналізу та дослідження загальних закономірностей.

В основі реалізації лежить дискретний підхід до часу. Це означає, що функціонування системи розглядається як послідовність окремих кроків, на кожному з яких відбувається оновлення стану. Такий підхід широко застосовується у задачах моделювання складних систем, оскільки дозволяє спростити обчислення та структурувати процес виконання [55]. При цьому вибір кроку часу є компромісом між точністю та швидкістю.

У межах одного кроку симуляції виконується фіксована послідовність дій. Спочатку оновлюється стан середовища, включаючи параметри деградації. Далі ці параметри передаються до моделі технічного об'єкта, яка формує новий стан на основі попереднього. Після цього дані надходять до модуля керування, який визначає необхідні зміни у режимі роботи. Такий підхід відповідає класичним принципам дискретно-подієвого моделювання [56].

Суттєвою особливістю моделі є її циклічний характер. Система постійно повторює один і той самий набір операцій, що дозволяє відстежувати зміну параметрів у часі. У результаті формується послідовність станів, яка може бути використана для подальшого аналізу. Важливо, що навіть незначні відхилення

можуть накопичуватися, що відповідає поведінці реальних систем у умовах деградації [57].

Реалізація деградації у моделі базується на поступовій зміні параметрів, що впливають на ефективність роботи системи. Ці зміни не є миттєвими, а відбуваються у часі, що дозволяє відобразити накопичувальний ефект. Додатково враховується випадкова складова, яка створює варіативність процесу та робить модель менш детермінованою.

Модель також враховує взаємодію між керуванням та станом системи. Керуючі дії впливають на параметри об'єкта, які, у свою чергу, визначають подальші рішення. Таким чином формується замкнений контур, що є характерною особливістю кіберфізичних систем. Подібний підхід дозволяє досліджувати не лише окремі стани, але й поведінку системи у динаміці [58].

З практичної точки зору важливим є забезпечення стабільності симуляції. Для цього у моделі передбачено обмеження на швидкість зміни параметрів, а також використання механізмів згладжування. Це дозволяє уникнути різких стрибків значень, які могли б призвести до некоректної роботи системи.

Крім того, модель підтримує зміну тривалості симуляції та кількості кроків. Це дозволяє досліджувати як короткочасні процеси, так і довготривалі ефекти деградації. Такий підхід є типовим для системного моделювання і забезпечує достатню гнучкість при проведенні експериментів [59].

Окремо слід відзначити можливість порівняння різних режимів роботи. У моделі передбачено як базовий режим (без адаптації), так і адаптивний. Це дозволяє оцінити ефективність алгоритму керування шляхом безпосереднього порівняння результатів. Подібний підхід широко використовується у симуляційних дослідженнях для оцінки ефективності рішень [60].

У підсумку, розроблена модель симуляції дозволяє відтворити поведінку системи у змінних умовах та дослідити вплив деградації на її функціонування. Вона поєднує у собі достатню простоту реалізації та можливість отримання

змістовних результатів, що робить її придатною для подальшої програмної реалізації та узгодження з апаратною частиною системи.

2.9 Висновки до другого розділу

У другому розділі було проведено моделювання та проектування кіберфізичної системи адаптації режимів функціонування технічного об'єкта в умовах деградуючого середовища. Виконано формалізацію задачі адаптації та визначено основні параметри системи, які характеризують стан об'єкта, вплив середовища та керуючі дії.

У ході роботи побудовано математичну модель технічного об'єкта, що описує зміну температури, тиску, продуктивності та енергоспоживання у дискретному часі. Також розроблено модель деградуючих факторів середовища, яка враховує накопичувальний характер деградації та її вплив на ефективність роботи системи.

Особливу увагу було приділено відображенню деградуючих факторів середовища, оскільки саме вони визначають умови, у яких повинна працювати система. Запропонована модель дозволяє враховувати поступове погіршення параметрів, їх взаємний вплив та накопичувальний характер деградації. Це створює основу для подальшого дослідження поведінки технічного об'єкта у змінних умовах.

Було розроблено алгоритм адаптації режимів функціонування, заснований на дослідженні поточного стану системи та використанні евристичних правил керування. Визначено, що запропонований підхід дозволяє стабілізувати ключові параметри системи та компенсувати негативний вплив деградації.

Розроблений алгоритм адаптації розглядається не як складний оптимізаційний механізм, а як практичний набір правил, придатний для реалізації у межах програмно-апаратної системи. Такий підхід дозволяє зберегти

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зрозумілість логіки керування та забезпечити реакцію системи на зміну ключових параметрів без надмірного ускладнення моделі.

У процесі проєктування визначено структуру програмно-апаратної кіберфізичної системи, що поєднує програмну симуляцію та апаратну частину на базі мікроконтролера ESP32. Описано інформаційні потоки між компонентами системи та обґрунтовано вибір технологій реалізації, зокрема мови програмування C#, платформи .NET, технології WPF, середовища Visual Studio та засобів Arduino.

Окремо визначено роль програмної та апаратної частин у загальній структурі системи. Програмна частина призначена для моделювання, візуалізації та дослідження результатів, тоді як апаратна частина демонструє принцип зчитування й обробки вхідних параметрів на рівні мікроконтролера. Це дозволяє зробити систему більш наочною та наближеною до практичного застосування.

У результаті розроблено модель симуляції роботи системи, яка дозволяє досліджувати поведінку технічного об'єкта в умовах деградації та оцінювати ефективність адаптивного керування. Отримані результати створюють основу для подальшої програмної та апаратної реалізації системи, а також проведення експериментальних досліджень.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

3.1 Загальна структура програмно-апаратної реалізації

Після завершення етапу моделювання та проектування логічним продовженням роботи є реалізація системи, яка поєднує програмну та апаратну частини. На цьому етапі попередньо розроблені моделі, алгоритми та структурні рішення переходять у практичну площину. При цьому важливо забезпечити не лише працездатність програмної симуляції, але й можливість демонстрації роботи окремого апаратного вузла кіберфізичної системи.

У загальному вигляді реалізація системи побудована за модульним принципом. Програмна частина відповідає за моделювання поведінки технічного об'єкта, візуалізацію зміни параметрів та дослідження ефективності адаптивного керування. Апаратна частина, у свою чергу, використовується для зчитування вхідних параметрів, їх первинної обробки та визначення поточного режиму роботи технічного об'єкта.

Апаратна частина реалізована на базі мікроконтролера ESP32. У межах даної роботи вона виконує роль демонстраційного апаратного вузла, який імітує взаємодію технічного об'єкта з деградуючим середовищем. Програма мікроконтролера обробляє отримані вхідні значення та виводить результати роботи системи у Serial Monitor.

Основу програмної структури складає модель технічного об'єкта. Вона реалізує логіку зміни параметрів системи та визначає її поведінку у відповідь на зовнішні впливи. Цей компонент, по суті, є ядром системи, оскільки саме через нього проходять усі основні обчислення. Його реалізація базується на тих принципах, що були визначені у попередньому розділі, але адаптована до умов програмного виконання.

Окремим модулем програмної частини реалізовано модель середовища. Вона відповідає за формування зовнішніх факторів, включаючи деградацію. У

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

програмному вигляді цей модуль генерує параметри, які впливають на об'єкт, та оновлює їх на кожному кроці симуляції. Важливо, що він працює незалежно від інших компонентів, що відповідає принципу модульності.

Модуль адаптивного керування реалізує алгоритм, описаний у попередньому розділі. Він отримує дані про стан системи та формує керуючі впливи. У програмному вигляді це представлено як набір методів, які обробляють вхідні параметри та повертають результати у вигляді змінених значень керування. Такий підхід дозволяє легко модифікувати алгоритм у разі необхідності.

Симуляційний модуль виконує роль координатора. Він організовує виконання системи у часі, визначає послідовність викликів та забезпечує взаємодію між компонентами. У програмному коді це реалізовано як цикл, у межах якого відбувається послідовне оновлення стану середовища, об'єкта та керування. Така структура є достатньо простою, але водночас ефективною для поставленої задачі.

Важливим елементом програмного забезпечення є модуль збору та обробки результатів. Він відповідає за фіксацію параметрів системи на кожному кроці симуляції та їх подальше використання для аналізу. У межах реалізації це може бути список значень або інша структура даних, яка накопичує інформацію у процесі виконання.

Окрему увагу слід приділити графічному інтерфейсу користувача. Він забезпечує взаємодію користувача із системою, дозволяючи задавати параметри симуляції, запускати процес та спостерігати за результатами. Інтерфейс реалізовано таким чином, щоб він відображав основні параметри системи у зручному вигляді, зокрема за допомогою графіків.

З точки зору організації коду, система побудована відповідно до принципів розділення відповідальності. Кожен клас або модуль виконує свою функцію, що дозволяє уникнути змішування логіки та спрощує розуміння структури

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

програми. Це також позитивно впливає на можливість тестування окремих компонентів.

Слід зазначити, що програмна реалізація є, певною мірою, відображенням моделі, але не її точною копією. Деякі аспекти можуть бути спрощені або реалізовані інакше з урахуванням особливостей програмного середовища. Це є нормальним явищем і не впливає суттєво на результати дослідження.

У підсумку, загальна структура програмно-апаратної реалізації забезпечує узгоджену роботу всіх компонентів системи та створює основу для подальшого тестування. Програмна частина дозволяє моделювати поведінку технічного об'єкта, відображати результати та проводити симуляційні експерименти, а апаратна частина демонструє принцип зчитування, обробки та інтерпретації вхідних параметрів на рівні мікроконтролера.

3.2 Реалізація моделі технічного об'єкта

Реалізація моделі технічного об'єкта є одним із центральних етапів програмної частини системи, оскільки саме цей компонент безпосередньо відповідає за відтворення поведінки об'єкта у процесі симуляції. Якщо на попередніх етапах модель існувала у вигляді абстрактних залежностей, то тут вона набуває конкретної програмної форми. І, що характерно, у цьому процесі доводиться певною мірою спрощувати або переосмислювати окремі аспекти, щоб зробити їх придатними для реалізації.

У програмному вигляді модель технічного об'єкта представлена у вигляді окремого класу, який інкапсулює всі основні параметри системи. До них належать температура, тиск, продуктивність та енергоспоживання. Кожен із цих параметрів зберігається як змінна стану і оновлюється на кожному кроці симуляції. Такий підхід дозволяє чітко відокремити дані від логіки їх обробки.

Основною функцією цього модуля є обчислення нового стану системи на основі попереднього. Для цього використовується метод оновлення, який

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приймає на вхід поточні значення параметрів, а також керуючі впливи та параметри середовища. У межах цього методу реалізуються залежності, що були визначені у математичній моделі, але у спрощеному вигляді, придатному для програмного виконання.

Важливою особливістю реалізації є використання покрокового оновлення стану. Це означає, що всі зміни параметрів відбуваються не миттєво, а поступово, від одного кроку симуляції до іншого. Такий підхід дозволяє уникнути різких стрибків значень і робить поведінку системи більш стабільною. У певному сенсі, це є компроміс між точністю та простотою реалізації.

Окремо слід відзначити взаємозв'язок між параметрами. У програмній моделі це реалізується через послідовність обчислень, де значення одного параметра впливає на інший. Наприклад, зміна енергоспоживання може впливати на температуру, а температура, у свою чергу, впливає на ефективність роботи. Така взаємозалежність дозволяє відобразити складні процеси у спрощеному вигляді.

Ще одним важливим аспектом є обмеження значень параметрів. У реальних системах існують фізичні межі, які не можуть бути перевищені. У програмній реалізації це враховано шляхом введення граничних значень, що запобігають некоректній поведінці моделі. Наприклад, температура не може бути нижчою за певний мінімум або перевищувати критичний рівень.

Слід також звернути увагу на те, що модель технічного об'єкта не працює ізольовано. Вона постійно взаємодіє з іншими компонентами системи, зокрема з моделлю середовища та модулем керування. Це означає, що її поведінка визначається не лише внутрішніми залежностями, але й зовнішніми впливами. Такий підхід дозволяє більш адекватно відобразити реальні умови функціонування.

З точки зору програмної організації, модель реалізована таким чином, щоб її можна було легко модифікувати. Наприклад, можна додати нові параметри або

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змінити існуючі залежності без суттєвого впливу на інші частини системи. Це відповідає принципу модульності, який був закладений на етапі проектування.

Окремо варто зазначити, що у процесі реалізації виникає необхідність балансувати між точністю та швидкістю. Надто складна модель може значно уповільнити симуляцію, тоді як надто спрощена можливо не дасть змістовних результатів. У даній роботі було обрано компромісний варіант, який дозволяє отримати адекватні результати при прийнятних витратах ресурсів.

Реалізація моделі технічного об'єкта забезпечує основу для функціонування програмної частини системи. Вона поєднує у собі логіку зміни параметрів, взаємодію із середовищем та реакцію на керуючі впливи, що дозволяє відтворити поведінку об'єкта у процесі симуляції та використати отримані результати для подальшого порівняння з роботою апаратної частини.

3.3 Реалізація модуля деградації середовища

Реалізація модуля деградації середовища є одним із ключових елементів програмної частини системи, оскільки саме через нього формується динаміка змін зовнішніх умов, у яких функціонує технічний об'єкт. Якщо говорити більш прямо, без цього модуля вся симуляція втратила б сенс, система просто працювала б у стабільних умовах, що не дозволило б оцінити ефективність адаптації. Тому під час реалізації важливо було не лише задати зміну параметрів, але й зробити цю зміну достатньо живою, щоб вона виглядала переконливо.

У структурі програмної частини модуль деградації реалізований як окремий клас, який інкапсулює всі параметри середовища. До основних змінних, що використовуються у цьому модулі, належать: рівень деградації, температура середовища, коефіцієнт втрат та коефіцієнт опору. Кожна з цих змінних має власну логіку оновлення, але при цьому вони взаємопов'язані між собою.

Центральним елементом модуля є змінна, що описує загальний рівень деградації. Вона виступає своєрідним інтегральним показником, який

узагальнює вплив різних негативних факторів. У програмній реалізації її значення змінюється на кожному кроці симуляції. При цьому використовується комбінований підхід: з одного боку, є базове зростання, яке забезпечує поступовість процесу, а з іншого боку додається випадкова складова, що створює нерівномірність.

Сам процес оновлення реалізований у вигляді окремого методу, який викликається симуляційним модулем на кожному кроці. У середині цього методу відбувається послідовне оновлення всіх параметрів. Така організація дозволяє централізувати логіку деградації та уникнути її дублювання у різних частинах програми.

Температура середовища у моделі визначається як функція від рівня деградації. У реалізації це виглядає як поступове збільшення базового значення температури з додаванням випадкових відхилень. Важливо, що ці відхилення є обмеженими, що дозволяє уникнути неконтрольованих стрибків. У результаті температура змінюється плавно, але не абсолютно рівномірно, що створює більш реалістичний ефект.

Коефіцієнт втрат у модулі відображає додаткові енергетичні витрати, які виникають у процесі роботи системи. У програмній реалізації він зростає разом із рівнем деградації, але не лінійно. Для цього використовується залежність, яка дозволяє посилювати ефект при досягненні певних значень. Це дає змогу моделювати ситуації, коли система довгий час працює відносно стабільно, а потім починає різко втрачати ефективність.

Коефіцієнт опору реалізований аналогічним чином. Він впливає на ефективність роботи технічного об'єкта, ускладнюючи виконання основних функцій. У програмному коді цей параметр змінюється поступово, але його вплив стає більш відчутним у міру зростання деградації. Це створює ефект накопичення проблем, який добре відповідає реальним умовам експлуатації.

Особливу увагу під час реалізації було приділено взаємозв'язку між параметрами. Замість того, щоб розглядати їх незалежно, у модулі передбачено

вплив одних параметрів на інші. Наприклад, підвищення температури може призводити до збільшення втрат, а це, у свою чергу, впливає на подальше зростання температури. У коді це реалізується через послідовні обчислення, де результат одного етапу використовується на наступному.

Ще одним важливим аспектом є контроль значень параметрів. У процесі симуляції можливі ситуації, коли значення можуть виходити за межі допустимого діапазону. Для запобігання цьому у модулі передбачено перевірки, які обмежують значення у заданих межах. Це дозволяє уникнути некоректної поведінки системи та забезпечує її стабільність.

У модулі також реалізовано можливість налаштування параметрів деградації. Користувач може змінювати швидкість зростання деградації, рівень випадкових коливань та інші характеристики. Це дозволяє використовувати одну і ту ж модель для різних сценаріїв, що є важливим для проведення експериментів.

З точки зору інтеграції, модуль деградації взаємодіє із симуляційним модулем та моделлю технічного об'єкта. Він отримує сигнал про початок нового кроку, оновлює свої параметри та передає їх далі. Така схема забезпечує чітке розділення відповідальності та спрощує структуру програми.

Слід також зазначити, що у процесі реалізації доводилося враховувати баланс між деталізацією та продуктивністю. Надмірно складна модель деградації могла б значно уповільнити симуляцію, тоді як надто проста, не дала б необхідного ефекту. У результаті було обрано компромісний варіант, який забезпечує достатню реалістичність при прийнятній швидкодії.

Реалізований модуль деградації середовища виконує важливу роль у програмній частині системи, формуючи змінні умови її функціонування. Він забезпечує поступове погіршення параметрів, створює взаємопов'язані ефекти та дозволяє досліджувати, як система реагує на ці зміни. Отримані у програмній симуляції результати надалі можуть бути використані для порівняння з роботою апаратної частини системи.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Реалізація алгоритму адаптації

Після реалізації моделі технічного об'єкта та модуля деградації середовища наступним логічним кроком є програмна реалізація алгоритму адаптації. Саме цей компонент відповідає за те, щоб система не просто спостерігала за змінами параметрів, а активно реагувала на них, змінюючи режими роботи. У певному сенсі, це той елемент, завдяки якому ідея адаптивного керування переходить від теоретичного опису до практичної реалізації у програмній частині системи.

У структурі програмної частини алгоритм адаптації реалізовано у вигляді окремого класу, який відповідає за обробку даних та формування керуючих впливів. Такий підхід дозволяє ізолювати логіку керування від інших компонентів системи та спростити її модифікацію у майбутньому. Клас отримує на вхід поточний стан технічного об'єкта і повертає значення керуючих параметрів, які будуть використані на наступному кроці симуляції.

Основою реалізації є правило-орієнтований підхід. Це означає, що алгоритм складається з набору умов та відповідних дій. Кожна умова перевіряє певний параметр системи, наприклад температуру або продуктивність, і у випадку відхилення від допустимого діапазону виконується коригуюча дія. Такий підхід, хоча і виглядає досить простим, дозволяє отримати стабільну та передбачувану поведінку системи.

У реалізації алгоритму використано набір порогових значень для кожного з параметрів. Наприклад, для температури визначається максимальне допустиме значення, перевищення якого призводить до зменшення рівня навантаження. Аналогічно, для продуктивності задається мінімальне значення, при зниженні якого система намагається збільшити потужність. Таким чином формується базова логіка керування.

Разом із тим, алгоритм не обмежується лише перевіркою поточних значень. У ньому також враховується напрям зміни параметрів. Це реалізується

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

через аналіз різниці між поточним та попереднім значенням. Якщо параметр змінюється у небажаному напрямку, алгоритм може реагувати ще до того, як буде досягнуто критичний рівень. Такий підхід дозволяє зробити систему більш чутливою до змін.

Ще одним важливим аспектом є обмеження на зміну керуючих параметрів. У програмній реалізації це означає, що навіть при значних відхиленнях значення керування змінюється поступово. Це дозволяє уникнути різких стрибків, які могли б призвести до нестабільної роботи системи. У коді це реалізується через введення максимально допустимого кроку зміни.

Особливу увагу було приділено узгодженню різних цілей керування. У системі одночасно існує декілька критеріїв: підтримання продуктивності, обмеження температури та мінімізація енергоспоживання. У програмній реалізації це вирішується шляхом введення пріоритетів. Наприклад, у випадку конфлікту між продуктивністю та температурою перевага надається безпеці, тобто обмеженню температури.

Алгоритм працює у циклічному режимі та викликається на кожному кроці симуляції. Він отримує актуальні дані про стан системи, обробляє їх та формує нові керуючі значення. При цьому зберігається інформація про попередній стан, що дозволяє враховувати динаміку змін. Такий підхід забезпечує реалізацію зворотного зв'язку, який є необхідною умовою адаптивного керування.

З точки зору програмної реалізації, алгоритм побудований таким чином, щоб його можна було легко змінювати. Наприклад, можна додати нові правила або змінити існуючі без впливу на інші частини системи. Це дозволяє використовувати даний модуль як основу для подальших експериментів із більш складними методами керування.

Слід також зазначити, що у процесі реалізації довелося враховувати баланс між простотою та ефективністю. Надто складний алгоритм міг би ускладнити систему та зробити її менш зрозумілою, тоді як надто простий – не дав би

помітного ефекту. У результаті було обрано компромісний варіант, який забезпечує достатній рівень адаптації при відносно простій реалізації.

Реалізований алгоритм адаптації забезпечує зміну режимів роботи системи у відповідь на деградацію середовища. Він дозволяє підтримувати ключові параметри у допустимих межах та демонструє принципову можливість компенсації негативних впливів. У подальшому ця логіка використовується як основа для перевірки роботи програмної симуляції та узгодження з апаратною частиною системи.

3.5 Розробка інтерфейсу користувача програмної частини

Після реалізації основних функціональних модулів програмної частини системи виникає необхідність створення інтерфейсу користувача, який забезпечує взаємодію із програмою. На перший погляд цей етап може виглядати менш важливим у порівнянні з моделюванням чи алгоритмами, однак на практиці саме інтерфейс визначає, наскільки зручно користувач може працювати із системою та інтерпретувати отримані результати. Особливо це актуально для симуляційних систем, де велике значення має наочність.

Інтерфейс користувача програмної частини реалізовано з використанням технології WPF, що дозволяє створювати гнучкі та динамічні елементи відображення. Основна ідея полягала у тому, щоб забезпечити просту та зрозумілу структуру, без перевантаження зайвими деталями.

Центральне місце займає область відображення параметрів системи. Тут у реальному часі відображаються основні показники: температура, тиск, продуктивність та енергоспоживання. Для цього використовуються як числові індикатори, так і графічні елементи. Такий підхід дозволяє одночасно отримувати як точні значення, так і загальне уявлення про тенденції змін.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основою апаратної частини є мікроконтролер ESP32. Його використання є доцільним, оскільки він має достатні обчислювальні можливості для зчитування вхідних сигналів, виконання простих розрахунків та формування результатів роботи системи. У даній реалізації ESP32 виконує роль апаратного вузла, який приймає дані від вхідних елементів, обробляє їх та визначає поточний режим функціонування технічного об'єкта.

Для отримання параметрів середовища використовується датчик DHT22, який забезпечує зчитування температури та вологості. Температура враховується під час визначення умов роботи технічного об'єкта, оскільки її підвищення може свідчити про погіршення середовища або зростання навантаження. Вологість у даній реалізації використовується як додатковий параметр спостереження за станом середовища.

Імітація деградації обладнання виконується за допомогою потенціометра. Зміна його положення дозволяє задавати різний рівень деградації у відсотках, не використовуючи реальне промислове обладнання. Такий підхід є зручним для перевірки реакції системи на поступове погіршення умов функціонування лабораторного насоса або компресора.

Апаратна частина працює за циклічним принципом. Спочатку мікроконтролер зчитує температуру, вологість та аналогове значення з потенціометра. Після цього аналогове значення перетворюється у рівень деградації, а на основі температури та деградації обчислюється умовна продуктивність технічного об'єкта. Далі система визначає поточний режим роботи: нормальний режим, режим компенсації або критичний режим.

Для кращого розуміння реалізації апаратної частини доцільно окремо показати схему її підключення. Це дозволяє наочно відобразити взаємодію датчика DHT22, потенціометра та мікроконтролера ESP32.

Схему підключення апаратної частини системи наведено на рисунку 3.4. Вона відображає взаємодію датчика DHT22, потенціометра та мікроконтролера ESP32, який виконує зчитування й обробку отриманих параметрів.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

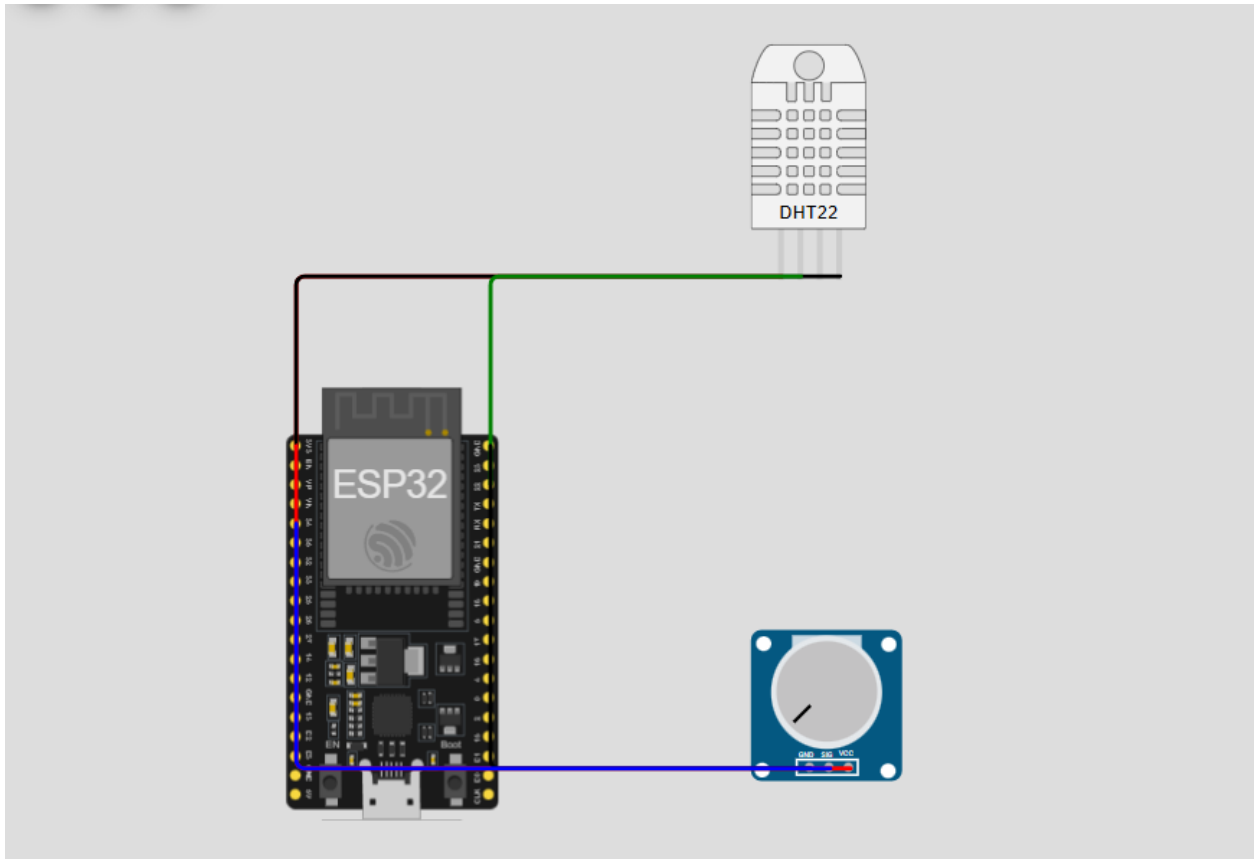


Рисунок 3.4 – Схема підключення апаратної частини системи на базі ESP32

Наведена схема показує, що апаратна частина має просту та зрозумілу структуру. Вхідні елементи формують сигнали, які надходять на мікроконтролер, після чого програма виконує їх обробку та визначає відповідний режим роботи. Завдяки цьому можна перевірити базову логіку адаптації без ускладнення апаратної реалізації.

Важливо, що апаратна частина не претендує на повне відтворення реального насоса або компресора. Її основне призначення полягає у демонстрації принципу роботи кіберфізичного вузла, який отримує вхідні дані, аналізує їх та формує результат. Такий підхід відповідає задачам роботи, оскільки дозволяє поєднати програмну симуляцію з практичною демонстрацією обробки параметрів на мікроконтролері.

У підсумку, реалізована апаратна частина на базі ESP32 забезпечує зчитування параметрів середовища, імітацію деградації обладнання та визначення режиму роботи технічного об'єкта. Це створює основу для

подальшого тестування апаратної частини та порівняння її роботи із результатами програмної симуляції.

3.7 Проведення симуляційних експериментів програмної частини

Після опису програмної та апаратної реалізації системи виникає можливість переходу до проведення симуляційних експериментів програмної частини. Саме на цьому етапі перевіряється працездатність розробленої моделі та оцінюється ефективність алгоритму адаптації. Якщо попередні підрозділи були більше про те, як система побудована, то тут уже йдеться про те, як вона поводить себе під час виконання.

Організація експериментів базується на запуску програмної симуляції з різними початковими параметрами та умовами середовища. У межах даної роботи було передбачено декілька типових сценаріїв, які дозволяють оцінити поведінку системи у різних режимах. Такий підхід дозволяє отримати більш повну картину та уникнути висновків, зроблених на основі одного окремого випадку.

Перший сценарій передбачає роботу системи без урахування деградації середовища. У цьому випадку всі параметри залишаються відносно стабільними, а система функціонує у близькому до номінального режимі. Такий експеримент використовується як базовий, оскільки дозволяє визначити нормальну поведінку системи, з якою у подальшому можна порівнювати інші результати.

Другий сценарій включає поступове зростання деградації без використання адаптивного керування. У цьому випадку можна спостерігати, як змінюються параметри системи під впливом негативних факторів. Як правило, це проявляється у зростанні температури, збільшенні енергоспоживання та зниженні продуктивності. Такий режим дозволяє оцінити, наскільки система є вразливою до деградації.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Третій сценарій передбачає використання алгоритму адаптації в умовах деградуючого середовища. У цьому випадку система не лише реагує на зміни, але й намагається компенсувати їх вплив. Результати такого експерименту дозволяють оцінити ефективність адаптивного підходу та визначити, наскільки він покращує роботу системи у порівнянні з попереднім сценарієм.

Під час проведення експериментів фіксуються основні параметри системи на кожному кроці симуляції. До них належать температура, тиск, продуктивність та енергоспоживання. Зібрані дані використовуються для побудови графіків, що дозволяє візуально оцінити динаміку змін.

Важливою особливістю є можливість варіювання параметрів експерименту. Зокрема, можна змінювати швидкість деградації, початкові значення параметрів або налаштування алгоритму адаптації. Це дозволяє досліджувати поведінку системи у широкому діапазоні умов.

Окрему увагу слід приділити тривалості експериментів. У межах роботи проводяться як короткі симуляції, що дозволяють оцінити миттєву реакцію системи, так і довготривалі, які відображають накопичувальний ефект деградації. Такий підхід дозволяє отримати більш повне уявлення про поведінку системи.

На рисунку 3.5 наведено приклад результатів роботи програмної частини системи, отриманих після виконання порівняльного аналізу режимів функціонування.

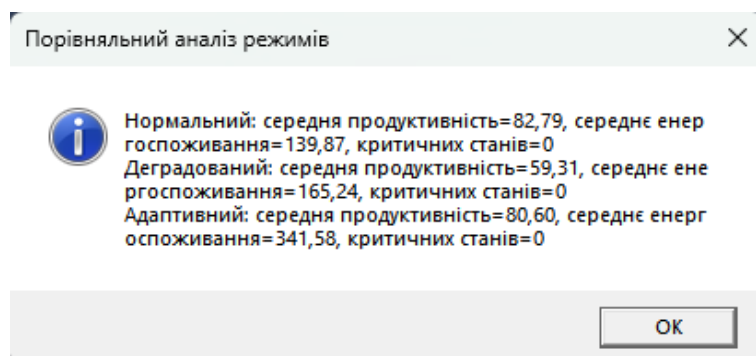


Рисунок 3.5 – Результати порівняльного аналізу режимів роботи програмної частини

Як видно з отриманих даних, поведінка програмної моделі суттєво залежить від умов експерименту. У нормальному режимі система працює без критичних станів, у деградованому режимі спостерігається зниження продуктивності та збільшення енергоспоживання, а використання адаптивного керування дозволяє частково стабілізувати параметри роботи системи.

Проведення симуляційних експериментів дозволяє не лише перевірити працездатність програмної моделі, але й оцінити ефективність запропонованого підходу до адаптивного керування. Отримані результати створюють основу для подальшого аналізу та порівняння з роботою апаратної частини системи.

3.8 Тестування апаратної частини системи

Після опису апаратної частини доцільно перейти до її тестування, оскільки саме на цьому етапі перевіряється, чи коректно мікроконтролер зчитує вхідні параметри, обробляє їх та визначає поточний режим роботи технічного об'єкта. У межах даної роботи тестування апаратної частини виконується для демонстрації принципу роботи кіберфізичного вузла, який реагує на зміну параметрів середовища та рівня деградації.

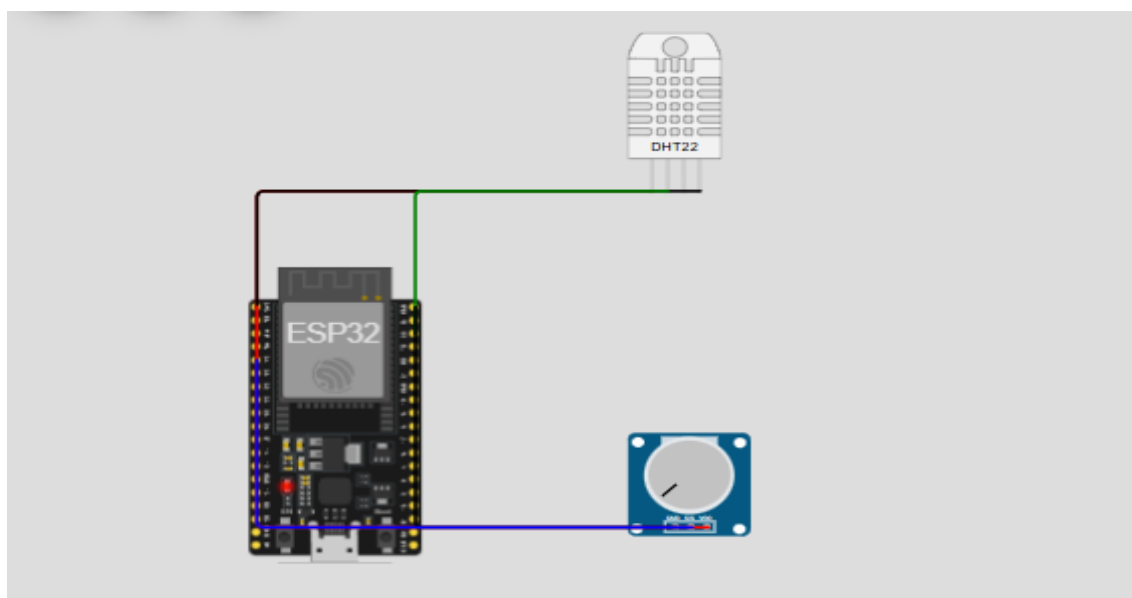
Під час тестування мікроконтролер ESP32 зчитує температуру та вологість із датчика DHT22, а також аналогове значення з потенціометра. Потенціометр використовується для імітації рівня деградації обладнання, що дозволяє поступово змінювати умови функціонування технічного об'єкта. Такий підхід дає можливість перевірити поведінку системи без використання реального насоса або компресора.

На основі отриманих даних програма мікроконтролера визначає стан технічного об'єкта. При низькому рівні деградації система працює у нормальному режимі, а адаптація режиму роботи не є необхідною. У разі збільшення деградації або погіршення параметрів середовища система

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переходить до режиму компенсації. Якщо ж значення параметрів виходять за допустимі межі, визначається критичний режим роботи.

Результати роботи апаратної частини виводяться у Serial Monitor. Це дозволяє спостерігати поточні параметри середовища, рівень деградації, розраховану продуктивність технічного об'єкта, умовні оберти та визначений режим роботи. Приклад виведення результатів роботи програми мікроконтролера наведено на рисунку 3.6.



Кіберфізична система адаптації режимів роботи
Технічний об'єкт: лабораторний насос або компресор

Поточні параметри середовища:

Температура: 24.0 °C

Вологість: 55.0 %

Стан технічного об'єкта:

Рівень деградації обладнання: 0 %

Розрахована продуктивність насоса: 100.0 %

Умовні оберти насоса: 1500 об/хв

Поточний режим роботи: нормальний режим

Стан системи: параметри знаходяться в допустимих межах.

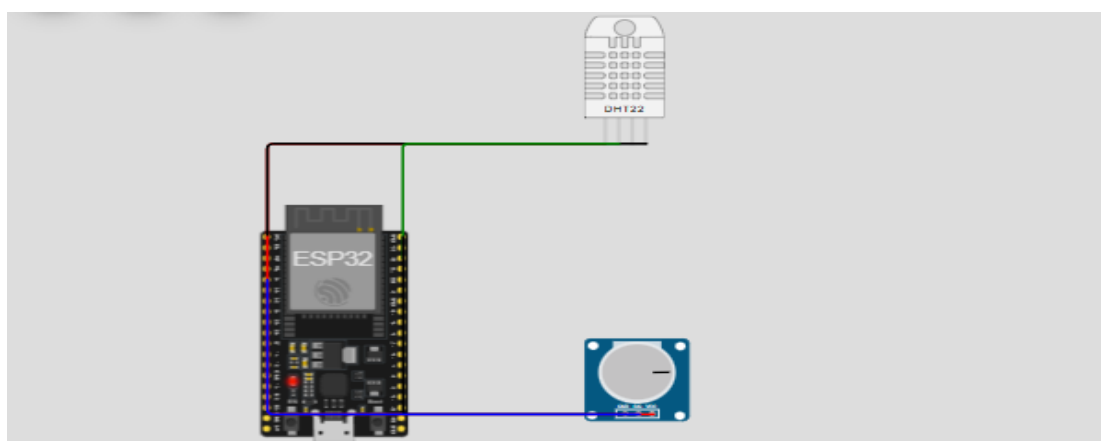
Адаптація режиму роботи не потрібна.

Рисунок 3.6 – Виведення результатів роботи програми мікроконтролера

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Наведені результати показують, що апаратна частина коректно зчитує вхідні параметри та формує інформацію про стан системи. У нормальному режимі значення деградації є низьким, продуктивність технічного об'єкта залишається близькою до номінальної, а система не потребує додаткової адаптації режиму роботи.

Для перевірки реакції системи було змінено положення потенціометра, що призвело до збільшення рівня деградації. У такому випадку програма мікроконтролера змінює оцінку стану технічного об'єкта та визначає інший режим роботи. Це дозволяє перевірити, що апаратна частина реагує не лише на стабільні умови, але й на зміну вхідних параметрів.



Кіберфізична система адаптації режимів роботи
Технічний об'єкт: лабораторний насос або компресор

Поточні параметри середовища:

Температура: 24.0 °C

Вологість: 55.0 %

Стан технічного об'єкта:

Рівень деградації обладнання: 82 %

Розрахована продуктивність насоса: 18.0 %

Умовні оберти насоса: 0 об/хв

Поточний режим роботи: критичний режим

Аварійне повідомлення:

Система перейшла у критичний режим.

Температура або рівень деградації перевищують допустимі значення.

Потрібна перевірка обладнання.

Рисунок 3.7 – Зміна режиму роботи системи під час тестування

Як видно з результатів тестування, апаратна частина здатна відображати зміну стану технічного об'єкта залежно від параметрів середовища та рівня деградації. При цьому її задача полягає не у повному фізичному відтворенні роботи насоса або компресора, а у демонстрації базового принципу адаптивного керування на рівні мікроконтролера.

У підсумку, тестування апаратної частини підтвердило працездатність реалізованого вузла на базі ESP32. Система забезпечує зчитування параметрів, імітацію деградації, визначення режиму роботи та виведення результатів для подальшого спостереження. Отримані результати можуть бути використані для порівняння з програмною симуляцією та загального аналізу роботи системи.

3.9 Дослідження результатів роботи системи

Після проведення симуляційних експериментів програмної частини та тестування апаратного вузла виникає необхідність узагальнити отримані результати. На цьому етапі важливо оцінити не лише окрему роботу програмної моделі або мікроконтролера, а й те, наскільки узгоджено вони відображають загальний принцип функціонування кіберфізичної системи адаптації режимів роботи технічного об'єкта.

Результати програмної симуляції показали, що поведінка системи суттєво залежить від умов експлуатації. У нормальному режимі параметри залишаються у допустимих межах, а система не переходить у критичні стани. Це підтверджує коректність базової моделі технічного об'єкта та дає можливість використовувати її як початковий варіант для подальшого порівняння.

У деградованому режимі без використання адаптивного керування спостерігається погіршення характеристик системи. Зокрема, зменшується продуктивність технічного об'єкта та зростає енергоспоживання. Така поведінка є очікуваною, оскільки деградує середовище створює додаткове навантаження на систему та поступово знижує ефективність її роботи.

Використання адаптивного керування дозволило частково компенсувати негативний вплив деградації. У порівнянні з деградованим режимом без адаптації система демонструє більш стабільні параметри та зменшення впливу критичних станів. Це свідчить про те, що розроблений алгоритм може підтримувати роботу технічного об'єкта у більш прийнятному режимі навіть за умов погіршення середовища.

Результати апаратної частини також підтвердили працездатність запропонованого підходу. Мікроконтролер ESP32 коректно зчитує параметри середовища, отримує значення рівня деградації та формує поточний режим роботи системи. У нормальному режимі система показує допустимі параметри, а при збільшенні рівня деградації переходить до критичного режиму та виводить відповідне повідомлення.

Особливу увагу слід звернути на те, що апаратна частина не дублює програмну симуляцію повністю. Її основне призначення полягає у демонстрації принципу роботи кіберфізичного вузла на рівні мікроконтролера. Завдяки цьому можна перевірити, як система реагує на зміну вхідних параметрів, навіть без використання реального насоса або компресора.

Порівняння програмної та апаратної частин показує, що вони доповнюють одна одну. Програмна частина дозволяє досліджувати поведінку системи у різних сценаріях, відобразити зміну параметрів і порівнювати режими роботи. Апаратна частина, у свою чергу, демонструє практичну реалізацію зчитування, обробки та інтерпретації параметрів на базі мікроконтролера.

Разом із тим, слід зазначити, що розроблена система має певні обмеження. Програмна модель є спрощеною і не враховує всі фізичні процеси, які можуть виникати у реальному технічному об'єкті. Апаратна частина також не є повноцінною моделлю промислового насоса або компресора, а використовується як демонстраційний вузол для перевірки логіки адаптації.

У підсумку, результати роботи системи підтверджують доцільність запропонованого програмно-апаратного підходу. Програмна частина забезпечує

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

симуляцію та оцінювання ефективності адаптивного керування, а апаратна частина демонструє можливість реалізації базових принципів кіберфізичної системи на мікроконтролері ESP32. Отримані результати створюють основу для подальшого вдосконалення системи та розширення її функціональних можливостей.

3.10 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було виконано програмно-апаратну реалізацію кіберфізичної системи адаптації режимів функціонування та проведено перевірку її роботи в умовах деградуючого середовища. Реалізація системи включає програмну частину для симуляції роботи технічного об'єкта та апаратну частину на базі мікроконтролера ESP32.

У ході роботи було реалізовано основні модулі програмної частини, зокрема модель технічного об'єкта, модуль деградації середовища, алгоритм адаптивного керування та засоби відображення результатів. Програмна частина дозволяє моделювати різні режими функціонування системи, змінювати параметри середовища та досліджувати ефективність адаптивного керування.

Також було розроблено графічний інтерфейс користувача, який забезпечує керування процесом симуляції та наочне представлення результатів. Завдяки цьому користувач має можливість спостерігати зміну параметрів технічного об'єкта, порівнювати режими роботи та оцінювати поведінку системи в умовах деградації.

Окремо реалізовано апаратну частину системи на базі ESP32. Вона забезпечує зчитування параметрів середовища, імітацію рівня деградації обладнання, обробку отриманих значень та визначення поточного режиму роботи технічного об'єкта. Результати роботи апаратного вузла виводяться у Serial Monitor, що дозволяє спостерігати реакцію системи на зміну вхідних параметрів.

У процесі дослідження було перевірено роботу програмної та апаратної частин системи. Результати показали, що у неадаптивному режимі спостерігається погіршення параметрів роботи технічного об'єкта, тоді як використання адаптивного керування дозволяє частково компенсувати негативний вплив деградуючого середовища. Апаратна частина підтвердила можливість практичної демонстрації базових принципів адаптивного керування на рівні мікроконтролера.

У результаті встановлено, що запропонована програмно-апаратна система забезпечує достатній рівень наочності, функціональності та придатності для дослідження роботи кіберфізичних систем у деградуючих умовах. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого вдосконалення систем адаптивного керування технічними об'єктами.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У даній бакалаврській роботі було розглянуто задачу розробки програмно-апаратної кіберфізичної системи адаптації режимів функціонування технічного об'єкта в умовах деградуючого середовища. Попри те, що сама постановка задачі виглядає доволі складною, у процесі виконання роботи було показано, що її можна звести до відносно зрозумілої моделі, яка піддається програмній реалізації, апаратній демонстрації та подальшому дослідженню.

У першому розділі було проведено дослідження предметної області, розглянуто поняття кіберфізичних систем, а також досліджено вплив деградуючих факторів на функціонування технічних об'єктів. Окрему увагу приділено існуючим підходам до адаптації режимів роботи та методам моделювання. У результаті сформульовано постановку задачі та визначено основні вимоги до розроблюваної системи. Важливо, що на цьому етапі вдалося не лише узагальнити теоретичні положення, але й окреслити межі дослідження.

У другому розділі було виконано моделювання та проектування системи. Зокрема, проведено формалізацію задачі, розроблено модель технічного об'єкта та модель деградуючого середовища. Окремо описано алгоритм адаптації, який базується на використанні порогових значень та дослідженні динаміки параметрів. Також було спроектовано структуру програмно-апаратної кіберфізичної системи, визначено інформаційні потоки між її компонентами, обґрунтовано вибір технологій реалізації та розроблено модель симуляції.

У третьому розділі здійснено програмно-апаратну реалізацію розробленої системи. Реалізовано програмну частину, що включає модель технічного об'єкта, модуль деградації середовища, алгоритм адаптивного керування та графічний інтерфейс користувача. Окремо реалізовано апаратну частину на базі мікроконтролера ESP32, яка забезпечує зчитування параметрів середовища, імітацію рівня деградації та визначення режиму роботи технічного об'єкта.

					КвРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі виконання роботи було проведено симуляційні експерименти програмної частини та тестування апаратного вузла. Отримані результати показали, що у разі відсутності адаптації система демонструє поступове погіршення параметрів під впливом деградації. Водночас використання алгоритму адаптації дозволяє частково компенсувати ці негативні впливи та підтримувати параметри у більш стабільному стані.

Дослідження результатів підтвердило ефективність запропонованого підходу. Хоча адаптація не усуває всі негативні фактори, вона суттєво зменшує їх вплив, що проявляється у більш стабільній роботі системи, зниженні темпів погіршення параметрів та більш раціональному використанні ресурсів. Апаратна частина, у свою чергу, показала можливість практичної демонстрації базових принципів адаптивного керування на рівні мікроконтролера.

Разом із тим, у процесі дослідження було виявлено певні обмеження. Зокрема, використана модель є спрощеною та не враховує всі можливі фактори, що можуть впливати на поведінку реальних систем. Крім того, апаратна частина не є повноцінним відтворенням промислового насоса або компресора, а використовується як демонстраційний вузол для перевірки логіки зчитування, обробки та інтерпретації параметрів.

Незважаючи на це, розроблена система може розглядатися як основа для подальших досліджень. Можливими напрямками розвитку є ускладнення моделі, використання більш просунутих методів керування, розширення функціональності програмного забезпечення, а також удосконалення апаратної частини системи.

У межах роботи було досягнуто поставленої мети та вирішено основні задачі дослідження. Отримані результати підтверджують доцільність використання адаптивних підходів у кіберфізичних системах та демонструють можливість їх реалізації у вигляді програмної симуляції й апаратного вузла на базі мікроконтролера.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Guan X., Yang B., Chen C., Dai W., Wang Y. A comprehensive overview of cyber-physical systems: From perspective of feedback system. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2016. Vol. 3, No. 1. P. 1–14.
2. Liu Y., Peng Y., Wang B., Yao S., Liu Z. Review on cyber-physical systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2017. Vol. 4, No. 1. P. 27–40.
3. Lee E. A., Seshia S. A. *Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach*. 2nd ed. Cambridge : MIT Press, 2017. 568 p.
4. Pivoto D. G. S., de Almeida L. F. F., da Rosa Righi R., Rodrigues J. J. P. C., Lugli A. B., Alberti A. M. Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 58. P. 176–192.
5. Tiboni M., Remino C., Bussola R., Amici C. A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 3. Art. 972.
6. Lei Y., Yang B., Jiang X., Jia F., Li N., Nandi A. K. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 138. Art. 106587.
7. Wang H., Liao H., Ma X., Bao R. Remaining Useful Life Prediction and Optimal Maintenance Time Determination for a Single Unit Using Isotonic Regression and Gamma Process Model. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 210. Art. 107504.
8. Zonta T., da Costa C. A., da Rosa Righi R., de Lima M. J., da Trindade E. S., Li G. P. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. Vol. 150. Art. 106889.
9. Zhang W., Yang D., Wang H. Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. *IEEE Systems Journal*. 2019. Vol. 13, No. 3. P. 2213–2227.

10. Zhao R., Yan R., Chen Z., Mao K., Wang P., Gao R. X. Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 115. P. 213–237.

11. Ali N., Hong J. E. Failure Detection and Prevention for Cyber-Physical Systems. *Computers*. 2018. Vol. 7, No. 4. Art. 68.

12. Carvalho T. P. et al. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 137. Art. 106024.

13. Ochella S., Shafiee M., Dinmohammadi F. Artificial intelligence in prognostics and health management of engineering systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 108. Art. 104552.

14. Arias Chao M., Kulkarni C., Goebel K., Fink O. Aircraft Engine Run-to-Failure Dataset under Real Flight Conditions for Prognostics and Diagnostics. *Data*. 2021. Vol. 6, No. 1. Art. 5.

15. Liu R., Yang B., Zio E., Chen X. Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 108. P. 33–47.

16. Jia F., Lei Y., Lin J., Zhou X., Lu N. Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. Vol. 72–73. P. 303–315.

17. Zhang Z., Wang Y. A deep learning-based fault diagnosis method for rotating machinery. *ISA Transactions*. 2018. Vol. 72. P. 303–315.

18. Lei Y., Li N., Guo L., Li N., Yan T., Lin J. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 104. P. 799–834.

19. Çınar Z. M., Nuhu A. A., Zeeshan Q., Korhan O., Asmael M., Safaei B. Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in Industry 4.0. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 19. Art. 8211.

					КВРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Aivaliotis P., Arkouli Z., Georgoulas K., Makris S. Degradation curves integration in physics-based models: Towards the predictive maintenance of industrial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2021. Vol. 71. Art. 102177.

21. Åström K. J., Murray R. M. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. 2nd ed. Princeton : Princeton University Press, 2021. 528 p.

22. Nguyen N. T. *Model-Reference Adaptive Control: A Primer*. Cham : Springer International Publishing, 2018. 444 p.

23. Rawlings J. B., Mayne D. Q., Diehl M. M. *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*. 2nd ed. Madison : Nob Hill Publishing, 2017. 623 p.

24. Belman-Flores J. M., Rodríguez-Valderrama D. A., Ledesma S., García-Pabón J. J., Hernández D., Pardo-Cely D. M. A Review on Applications of Fuzzy Logic Control for Refrigeration Systems. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 3. Art. 1302.

25. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge : MIT Press, 2016. 800 p.

26. Sutton R. S., Barto A. G. *Reinforcement Learning: An Introduction*. 2nd ed. Cambridge : MIT Press, 2018. 552 p.

27. Polyak B. T., Khlebnikov M. V., Shcherbakov P. S. Linear Matrix Inequalities in Control Systems with Uncertainty. *Automation and Remote Control*. 2021. Vol. 82, No. 1. P. 1–40.

28. Shihabudheen K. V., Pillai G. N. Recent advances in neuro-fuzzy system: A survey. *Knowledge-Based Systems*. 2018. Vol. 152. P. 136–162.

29. Schwenzer M., Ay M., Bergs T., Abel D. Review on model predictive control: an engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 117. P. 1327–1349.

30. Venkatasubramanian V. The promise of artificial intelligence in chemical engineering: Is it here, finally? *AIChE Journal*. 2019. Vol. 65, No. 2. P. 466–478.

31. Taha W. M., Taha A.-E. M., Thunberg J. *Cyber-Physical Systems: A Model-Based Approach*. Cham : Springer, 2021. 187 p.

					КВРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

44. Cleary S. *Concurrency in C# Cookbook*. 2nd ed. Sebastopol : O'Reilly Media, 2019. 554 p.

45. Microsoft. *Windows Presentation Foundation for .NET documentation*. Microsoft Learn. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/desktop/wpf/> (дата звернення: 6.04.2026).

46. Microsoft. *XAML overview*. Microsoft Learn. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/desktop/wpf/xaml/> (дата звернення: 7.04.2026).

47. Microsoft. *Graphics and Multimedia*. Microsoft Learn. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/desktop/wpf/graphics-multimedia/> (дата звернення: 7.04.2026).

48. Microsoft. *Data Binding in WPF*. Microsoft Learn. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/desktop/wpf/data/> (дата звернення: 7.04.2026).

49. Microsoft. *Introduction to the MVVM Toolkit*. Microsoft Learn. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/communitytoolkit/mvvm/> (дата звернення: 11.04.2026).

50. Freeman E., Robson E. *Head First Design Patterns: Building Extensible and Maintainable Object-Oriented Software*. 2nd ed. Sebastopol : O'Reilly Media, 2020. 669 p.

51. Kokosa K. *Pro .NET Memory Management: For Better Code, Performance, and Scalability*. New York : Apress, 2018. 1106 p.

52. LiveCharts. *LiveCharts2 documentation*. URL: <https://livecharts.dev/docs/> (дата звернення: 13.05.2026).

53. Richards M., Ford N. *Fundamentals of Software Architecture: An Engineering Approach*. Sebastopol : O'Reilly Media, 2020. 432 p.

54. Microsoft. *Visual Studio Documentation*. Microsoft Learn. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/visualstudio/> (дата звернення: 13.05.2026).

					КВРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк. 80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

55. Zeigler B. P., Muzy A., Kofman E. *Theory of Modeling and Simulation: Discrete Event and Iterative System Computational Foundations*. 3rd ed. London : Academic Press, 2018. 692 p.

56. Nelson B. L. *Foundations and Methods of Stochastic Simulation: A First Course*. 2nd ed. Cham : Springer, 2021. 329 p.

57. Palmer G. I., Knight V. A., Harper P. R., Hawa A. L. Ciw: An open-source discrete event simulation library. *Journal of Simulation*. 2019. Vol. 13, No. 1. P. 68–82.

58. Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A. Y. C. Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*. 2019. Vol. 5, No. 4. P. 653–661.

59. Forbus J. J., Berleant D. Discrete-event simulation in healthcare settings: a review. *Modelling*. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 417–433.

60. Ucar I., Smeets B., Azcorra A. simmer: Discrete-Event Simulation for R. *Journal of Statistical Software*. 2019. Vol. 90, No. 2. P. 1–30.

					КВРКІ.240490.22.04.86 ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

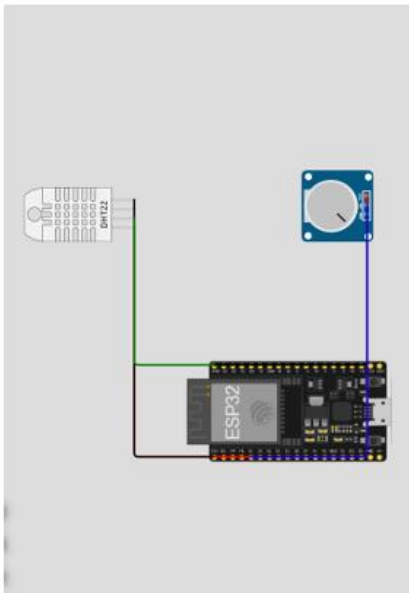
ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

Копія креслення «Результати роботи апаратної частини системи»

КерХІ. 240490.22.04.86

Схема підключення апаратної частини системи



Робота апаратної частини системи у нормальному режимі

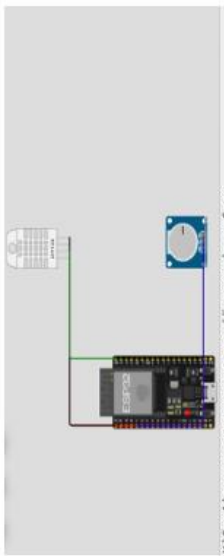
Кіберфізична система адаптації режимів роботи
Технічний об'єкт: лабораторний насос або компресор

Поточні параметри середовища:
Температура: 24.0 °C
Вологість: 55.0 %

Стан технічного об'єкта:
Рівень деградації обладнання: 0 %
Розрахована продуктивність насоса: 100.0 %
Умовні оберти насоса: 1380 об/хв

Поточний режим роботи: нормальний режим

Стан системи: параметри знаходяться в допустимих межах.
Адаптація режиму роботи не потрібна.



Робота апаратної частини системи у критичному режимі

Кіберфізична система адаптації режимів роботи
Технічний об'єкт: лабораторний насос або компресор

Поточні параметри середовища:
Температура: 24.0 °C
Вологість: 55.0 %

Стан технічного об'єкта:
Рівень деградації обладнання: 82 %
Розрахована продуктивність насоса: 18.0 %
Умовні оберти насоса: 0 об/хв

Поточний режим роботи: критичний режим

Аварійне повідомлення:
Система перейшла у критичний режим.
Температура або рівень деградації перевищують допустимі значення.
Потрібна перевірка обладнання.

КерХІ. 240490.22.04.86 ЕБ

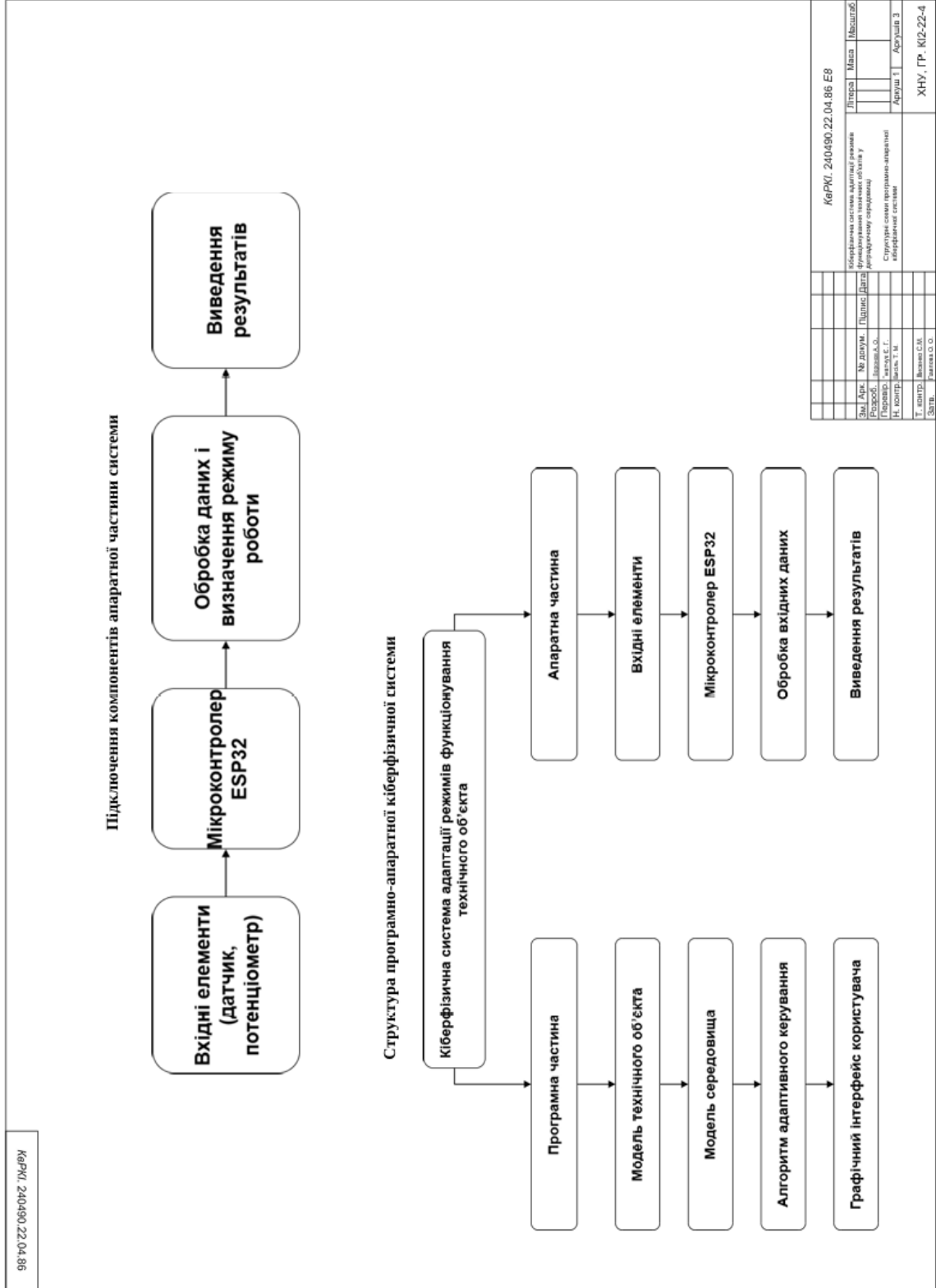
Зм. Акт.	№ докум.	Підпис	Дата	КерХІ. 240490.22.04.86 ЕБ
Розроб.	Виконав.	Перевір.	Дата	КерХІ. 240490.22.04.86 ЕБ
Н. контро.	Н. зам.	Н. зам.	Дата	КерХІ. 240490.22.04.86 ЕБ
Т. адмтр.	Виконав. С.М.	Виконав. С.М.	Дата	КерХІ. 240490.22.04.86 ЕБ
Зам.	Зам.	Зам.	Дата	КерХІ. 240490.22.04.86 ЕБ

ХНУ, ГР, КІЗ-22-4

ДОДАТОК В

(обов'язковий)

Копія креслення «Структурні схеми програмно-апаратної кіберфізичної системи»



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: Артур ВОРОНОВ

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система адаптації режимів функціонування технічних об'єктів у деградуєчому середовищі

Експерт: Єлизавета ГНАТЧУК

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 6.12%

Коефіцієнт подібності 2: 2.32%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-06 11:35:14.0

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.

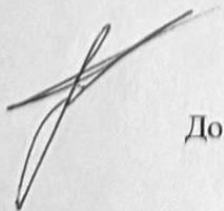
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

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 процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-06-06

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

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

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 6%

ID: 273896 Назва: БКР Кіберфізична система адаптації режимів функціонування технічних об'єктів у деградуєчому середовищі Додано в БД: 2026-06-06 Автора: Артур ВОРОНОВ Керівники: Єлизавета ГНАТЧУК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	122705	1024	2749 (2%)	36 (4%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Воронов Артур Олександрович

Тема: Кіберфізична система адаптації режимів функціонування технічних об'єктів у деградуючому середовищі

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 81

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження кіберфізичної системи адаптації режимів функціонування технічного об'єкта в умовах деградуючого середовища.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено дослідження предметної області кіберфізичних систем, розглянуто поняття деградуючого середовища, його вплив на функціонування технічних об'єктів, особливості роботи насосів і компресорів у змінних умовах, а також існуючі методи адаптації режимів функціонування. У другому розділі виконано моделювання та проєктування кіберфізичної системи: формалізовано задачу адаптації, побудовано математичну модель технічного об'єкта, описано деградуючі фактори середовища, розроблено алгоритм адаптивного керування, спроєктовано архітектуру програмно-апаратної системи, визначено інформаційні потоки та обґрунтовано вибір технологій реалізації. У третьому розділі виконано програмно-апаратну реалізацію та тестування системи: реалізовано модель технічного об'єкта, модуль деградації середовища, алгоритм адаптації, графічний інтерфейс користувача, апаратну частину на базі ESP32 із датчиком DHT22 та потенціометром, проведено симуляційні експерименти програмної частини й тестування апаратного вузла з виведенням результатів у Serial Monitor.

4. Позитивні сторони роботи: практична спрямованість роботи, поєднання програмної симуляції з апаратною частиною на базі ESP32, наочне відображення результатів роботи системи.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага перевірки системи на реальному промисловому обладнанні.

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 науково-технічному рівні.


8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: добре (75/С)

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

Петрик Наталія Сергіївна, доцент кафедри КБ

“11” серпня _____ 2026 р.

 _____ (підпис)

Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Артур ВОРОНОВ

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-4

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



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система адаптації режимів функціонування технічних об'єктів у деградуючому середовищі

Автор Артур ВОРОНОВ

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: д.т.н., проф. Єлизавета ГНАТЧУК

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


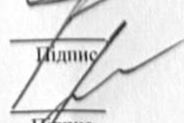
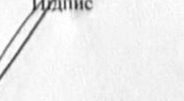
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 6.12%; та системою Anti-Plagiarism складає 1.0% що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Підпис

Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій Нічепорук
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Єлизавета ГНАТЧУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ