

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Програмно-технічний засіб жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів

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. 2301111.23.01.46 ПЗ

Виконав здобувач III курсу, група КІ2с-23-1



Підпис

Владислав КОСТЮК

Ініціали, прізвище

Керівник

Науковий ступінь, учене звання



Підпис

Сергій ЛИСЕНКО

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

Науковий ступінь, учене звання



Підпис

Сергій ЛИСЕНКО

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС

«01» червня 2026 р.

дата



Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

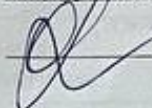
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІС

 Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Костюку Владиславу Михайловичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Програмно-технічний засіб жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів

Керівник проекту (роботи) Лисенко Сергій Миколайович, 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) _____

Програмно-технічний засіб жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів та постановка задачі щодо її удосконалення

Проектування програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів

Програмно-апаратна реалізація засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів

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

Архітектура ПЗ проекту

Логіка роботи програмно-технічного засобу

Апаратне забезпечення проекту

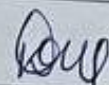
6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Пр
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	ви
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	ви
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2026	ви
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проєктування програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів	01.04.2026	ви
5	Робота над розділом 3 – проєктування програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів	29.04.2026	ви
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	ви
7	Попередній захист ВКР	26.05.2026	ви
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	





Здобувач 
Підпис

Владислав КОСТИЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Сергій ЛИСЕНКО
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.2301111.23.01.46 ПЗ	Пояснювальна записка	63		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КвРКІ.2301111.23.01.46 Е8	Архітектура ПЗ проекту	1		
3		КвРКІ.2301111.23.01.46 Е8	Логіка роботи програмно-технічного засобу	1		
4		КвРКІ.2301111.23.01.46 Е8	Апаратне забезпечення проекту	1		
КвРКІ.2301111.23.01.46 ВП						
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	Літера	Аркуш
Розробив		Костюк		01.06	У	1
Перевір.		Лисенко		01.06		1
Н. контр.		Лисенко		01.06	ХНУ, КІ2с-2-1	
Зпв.		Павлова		01.06		
Відомість проекту						

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Програмно-технічний засіб жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів».

Автор роботи: Владислав КОСТЮК.

Керівник роботи: Сергій ЛИСЕНКО.

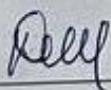
Пояснювальна записка: 63 с., 13 рис., 1 табл., 3 дод., 60 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

ESP32, ЖЕСТОВЕ КЕРУВАННЯ, ІНЕРЦІЙНИЙ СЕНСОР, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ ЗАСІБ, РОЗПІЗНАВАННЯ ЖЕСТІВ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та аналізу програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів. Актуальність теми зумовлена потребою у створенні зручних, компактних і швидких засобів взаємодії користувача з технічними системами без постійного використання кнопок, перемикачів або сенсорних екранів. Жестове керування дає змогу перетворювати природні рухи руки на керуючі команди, що підвищує мобільність, гнучкість і зручність роботи кіберфізичної системи.

Метою роботи є проектування, реалізація та перевірка програмно-технічного засобу для зчитування рухів користувача, оброблення даних інерційного сенсора та формування керуючих команд для виконавчого елемента кіберфізичної системи. Для досягнення поставленої мети проаналізовано існуючі підходи до жестового керування, розглянуто особливості використання акселерометрів і гіроскопів, визначено апаратну основу системи, побудовано модель взаємодії інерційного модуля, мікроконтролера та керованого об'єкта.



Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 Аналіз предметної області та існуючих рішень.....	6
1.1 Особливості кіберфізичних систем та роль людино-машинних інтерфейсів.....	6
1.2 Аналіз існуючих підходів до жестового керування технічними системами.....	8
1.3 Інерційні сенсори як основа для розпізнавання жестівІнерційні сенсори як основа для розпізнавання жестів.....	10
1.4 Особливості обробки даних інерційних сенсорів у задачах розпізнавання рухів.....	13
1.5 Аналіз існуючих програмно-технічних рішень жестового керування та їх обмежень.....	15
1.6 Висновок до першого розділу.....	20
2 Розроблення концепції та моделі програмно-технічного засобу жестового керування.....	21
2.1 Формування загальної концепції жестового керування кіберфізичною системою.....	21
2.3 Побудова моделі взаємодії інерційного сенсора, мікроконтролера та керованого об'єкта.....	30
2.4 Організація потоку даних від інерційного модуля до блока прийняття керуючого рішення.....	34
2.5 Розроблення логіки перетворення рухів користувача у керуючі команди.....	38
2.6 Висновки до другого розділу.....	43
3 Практична реалізація програмно-технічного засобу жестового керування.....	45
3.1 Складання апаратної частини засобу жестового керування.....	45
3.2 Налаштування зчитування даних з інерційного сенсора.....	49

КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ

Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата	Програмно-технічний засіб жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів	Літера	Арк.ш.	Арк.шів
Виконав		Владислав КОСТЮК	<i>[Підпис]</i>	01.06		Пояснювальна записка	у	2
Перевір.		Сергій ЛИСЕНКО	<i>[Підпис]</i>	01.06				
Н.контр.		Сергій ЛИСЕНКО	<i>[Підпис]</i>	01.06				
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА	<i>[Підпис]</i>	01.06				
ХНУ КІ2с-23-1								

3.3 Реалізація попередньої обробки та стабілізації вимірювань	54
3.4 Реалізація програмної логіки визначення жестів користувача	58
3.5 Висновки до третього розділу	64
Висновки.....	65
Перелік джерел посилань	67
Додаток А Копія креслення «Архітектура ПЗ проєкту».....	75
Додаток Б Копія креслення «Логіка роботи програмно-технічного засобу»	76
Додаток В Копія креслення «Апаратне забезпечення проєкту»	77

ВСТУП

У сучасних технічних системах дедалі більшого значення набуває питання зручної, швидкої та надійної взаємодії людини з пристроями керування. Кіберфізичні системи, які поєднують апаратні компоненти, програмне забезпечення та фізичні процеси, вже активно застосовуються у промисловості, транспорті, робототехніці, медицині та побутових інтелектуальних пристроях. Розширення сфер їх використання природно підвищує вимоги не лише до точності та стабільності роботи таких систем, а й до способів керування ними. Класичні інтерфейси, що ґрунтуються на кнопках, перемикачах або сенсорних екранах, у багатьох випадках залишаються ефективними, проте вони не завжди забезпечують достатній рівень зручності, особливо в умовах динамічної роботи, обмеженого простору або необхідності швидкої реакції оператора.

У цьому контексті все більшої уваги набувають альтернативні підходи до організації людино-машинної взаємодії, серед яких особливе місце посідає жестове керування.

Використання природних рухів людини як команд дозволяє зменшити кількість проміжних дій між наміром і виконанням операції, зробити керування інтуїтивнішим і ближчим до звичних способів взаємодії з навколишнім середовищем. Жестові інтерфейси вже знаходять застосування у мультимедійних системах, ігрових платформах, середовищах віртуальної та доповненої реальності, а також у спеціалізованих технічних комплексах. Водночас перенесення подібних підходів у сферу кіберфізичних систем висуває додаткові вимоги до надійності, стабільності та передбачуваності роботи інтерфейсу.

Однією з ключових проблем у цій галузі залишається вибір апаратної основи для реалізації жестового керування. Оптичні системи, що використовують камери та алгоритми комп'ютерного зору, дозволяють реалізувати безконтактну взаємодію, проте виявляються чутливими до умов

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

освітлення, фону сцени та наявності перешкод. Носимі пристрої з датчиками положення або м'язової активності забезпечують вищу стабільність вимірювань, але потребують додаткового обладнання та ретельного налаштування. У цьому переліку окреме місце займають інерційні сенсори, зокрема акселерометри та гіроскопи, які дозволяють безпосередньо реєструвати рухи та обертання у просторі. Такі сенсори вирізняються компактністю, відносною простотою інтеграції та незалежністю від зовнішніх умов, що робить їх привабливою основою для побудови мобільних і вбудованих систем керування.

Разом із тим використання інерційних сенсорів породжує низку технічних викликів, пов'язаних з обробкою вимірюваних даних, їх фільтрацією, інтерпретацією та перетворенням у зрозумілі керуючі команди.

Сигнали таких сенсорів мають часовий характер, містять шум і похибки, а розпізнавання жестів вимагає виділення характерних ознак руху та коректного визначення меж окремих дій. У межах кваліфікаційної роботи бакалавра ці аспекти розглядаються як важлива складова загальної проблеми створення ефективного програмно-технічного засобу жестового керування для кіберфізичної системи.

Актуальність теми зумовлюється потребою у більш природних і гнучких інтерфейсах керування, здатних працювати в різних умовах експлуатації та легко інтегруватися у сучасні технічні комплекси.

Жестове керування на основі інерційних сенсорів розглядається як перспективний напрям, що дозволяє поєднати простоту апаратної реалізації з достатньою інформативністю вимірювань для формування керуючих команд. Це створює підґрунтя для розроблення рішень, орієнтованих не лише на демонстраційні або розважальні сценарії, а й на практичне використання у складі кіберфізичних систем різного призначення.

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Особливості кіберфізичних систем та роль людино-машинних інтерфейсів

У межах кваліфікаційної роботи бакалавра кіберфізичні системи розглянуто як складні інтегровані комплекси, у яких обчислювальні модулі, програмне забезпечення та фізичні об'єкти працюють у тісному взаємозв'язку та формують єдине функціональне середовище [17], [38]. Такий підхід дозволяє не лише збирати інформацію про стан фізичних процесів, а й здійснювати керуючий вплив у реальному часі, з урахуванням змін зовнішніх умов і внутрішніх параметрів системи [38], [56]. У сучасних технічних рішеннях кіберфізичні системи вже зайняли важливе місце в промисловості, транспорті, робототехніці, медицині та побутових інтелектуальних пристроях, де поєднання сенсорів, виконавчих механізмів і програмної логіки дозволяє досягати більшої автономності та гнучкості роботи [17], [55].

Характерною особливістю таких систем є наявність замкненого циклу «вимірювання - обробка - керування», у межах якого фізичні величини перетворюються на цифрові дані, аналізуються програмними засобами та використовуються для формування керуючих дій [38], [41]. У результаті формується середовище, у якому межа між фізичним і цифровим рівнями стає умовною, а ефективність роботи системи значною мірою визначається якістю їх узгодження [17], [56]. Саме тому під час проектування кіберфізичних систем особлива увага приділяється не лише вибору апаратних компонентів або алгоритмів обробки даних, а й організації взаємодії людини з цим середовищем [55], [47].

Людино-машинний інтерфейс у межах кіберфізичних систем охоплює всі засоби, за допомогою яких оператор передає команди та отримує інформацію про стан системи [47], [48]. Традиційні рішення, що ґрунтуються на кнопках, клавіатурах, пультах керування або сенсорних екранах, тривалий час

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залишаються основним способом взаємодії, проте в багатьох практичних ситуаціях вони створюють додаткові обмеження [48], [45]. Зокрема, такі інтерфейси потребують фізичного контакту, займають певний простір, а також вимагають від користувача звикання до конкретної схеми керування, що у складних або динамічних умовах може призводити до зниження швидкості реакції та збільшення ймовірності помилок [45], [46].

У межах цієї кваліфікаційної роботи бакалавра людино-машинний інтерфейс розглядається як повноцінна складова архітектури кіберфізичної системи, що безпосередньо впливає на її практичну цінність [47], [55]. Інтерфейс перестає виконувати роль другорядного елемента і сприймається як інструмент, через який реалізується основна логіка взаємодії між людиною та технічною системою [48], [45]. Зручність, інтуїтивність і передбачуваність такої взаємодії визначають, наскільки ефективно система може використовуватися в реальних умовах експлуатації, особливо у випадках, коли потрібна швидка реакція або виконання точних керуючих дій [46], [47].

Жестове керування в цьому контексті розглядається як перспективний напрям розвитку людино-машинних інтерфейсів для кіберфізичних систем [1], [8], [33]. Використання природних рухів людини дозволяє зменшити кількість проміжних дій між наміром і виконанням команди, що позитивно впливає на швидкість і зручність керування [33], [48]. Крім того, такий підхід знімає обмеження, пов'язані з необхідністю постійного контакту з фізичними органами керування, що є важливим для середовищ із підвищеними вимогами до безпеки, чистоти або мобільності оператора [45], [48]. У результаті керування набуває більш інтуїтивного характеру та краще відповідає природній логіці дій людини [1], [8].

Особливу роль у реалізації жестових інтерфейсів відіграє узгодження апаратної та програмної частин системи [9], [10], [12]. Дані, що надходять від сенсорів, потребують попередньої обробки, фільтрації та інтерпретації, після чого перетворюються на керуючі команди для виконавчих модулів [24], [25],

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[29]. У межах кіберфізичної системи всі ці етапи інтегруються в єдиний процес, що дозволяє забезпечити стабільну та передбачувану реакцію на дії користувача [9], [41]. Це дозволяє розглядати жестове керування не як допоміжну можливість, а як повноцінний механізм взаємодії, який визначає характер роботи всієї системи [1], [10].

У підсумку людино-машинний інтерфейс у кіберфізичних системах розглядається як ключовий елемент, що поєднує технічну частину з практичними потребами користувача [47], [55]. У межах кваліфікаційної роботи бакалавра такий підхід дозволяє закласти основу для створення програмно-технічного засобу, у якому жестове керування виступає не додатковою функцією, а логічно інтегрованою частиною загальної архітектури системи, орієнтованої на зручне та ефективне використання в реальних умовах [1], [9], [12].

1.2 Аналіз існуючих підходів до жестового керування технічними системами

Жестове керування вже не сприймається як експериментальна або суто демонстраційна технологія, оскільки воно активно впроваджується у побутову електроніку, робототехніку, системи віртуальної та доповненої реальності, а також у промислові та сервісні рішення [1], [8], [33], [45]. Такий інтерес зумовлений прагненням зробити взаємодію людини з технікою більш природною та наближеною до звичних рухів, без необхідності постійного використання традиційних органів керування [45], [48].

Найпоширенішими підходами до жестового керування вважаються рішення, що базуються на використанні оптичних засобів спостереження, зокрема камер і систем комп'ютерного зору [2], [6], [33]. У таких системах рухи рук або тіла фіксуються у вигляді відеопотоку, після чого програмними засобами виконується аналіз зображення та виділення характерних ознак жестів [2], [33].

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Подібний підхід дозволяє реалізувати безконтактне керування та не потребує розміщення датчиків безпосередньо на користувачі [33], [48]. Водночас у практичних умовах виявляється залежність від освітлення, фону сцени, наявності перешкод та обчислювальних ресурсів, необхідних для обробки зображень у реальному часі, що ускладнює використання таких систем у мобільних або промислових середовищах [6], [45], [48].

Інший підхід ґрунтується на застосуванні спеціалізованих рукавичок або контролерів, оснащених датчиками згину, тиску та положення у просторі [14], [18]. Такі рішення дозволяють з високою точністю фіксувати рухи пальців і кисті, що позитивно впливає на якість розпізнавання жестів і стабільність роботи системи [14], [18]. Разом із тим використання додаткових пристроїв на руках обмежує свободу рухів, потребує попереднього налаштування та може знижувати зручність у тривалому використанні [18], [45]. Крім того, вартість подібних апаратних рішень часто залишається досить високою, що ускладнює їх масове впровадження у прості або бюджетні системи керування [18], [48].

Окрему групу становлять підходи, засновані на використанні інерційних сенсорів, таких як акселерометри та гіроскопи, які реєструють прискорення та кутові швидкості руху [3], [9], [10]. У цьому випадку жест інтерпретується не за візуальним образом, а за характером зміни вимірюваних фізичних величин у часі [9], [12]. Подібний підхід дозволяє реалізувати компактні та енергоефективні рішення, які не залежать від умов освітлення та не потребують складних обчислень, пов'язаних з обробкою зображень [9], [10]. Сенсори можуть бути інтегровані у переносні пристрої або закріплені безпосередньо на руці користувача, що забезпечує стабільність зчитування рухів навіть у складних умовах експлуатації [10], [12].

У межах кваліфікаційної роботи бакалавра звернено увагу на те, що кожен із наявних підходів має власні переваги та обмеження, які визначають сферу його доцільного застосування [1], [8], [33]. Оптичні системи забезпечують безконтактну взаємодію, але залишаються чутливими до зовнішніх умов [6],

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[48]. Рішення на основі спеціалізованих контролерів відзначаються високою точністю, проте потребують додаткового обладнання та знижують універсальність використання [14], [18]. Підходи з використанням інерційних сенсорів вирізняються простотою апаратної реалізації та незалежністю від навколишнього середовища, однак вимагають коректної обробки сигналів і продуманої логіки інтерпретації рухів [9], [12], [24].

З огляду на це у сучасних системах дедалі частіше реалізується поєднання різних методів або орієнтація на ті рішення, які забезпечують оптимальний баланс між складністю реалізації, надійністю роботи та зручністю для користувача [1], [8], [33]. У межах цієї кваліфікаційної роботи бакалавра акцент зроблено на підході, що базується на використанні інерційних сенсорів, оскільки він дозволяє створити компактний програмно-технічний засіб жестового керування, придатний для інтеграції у кіберфізичні системи та використання в умовах, де простота, мобільність і стабільність роботи мають першочергове значення [9], [10], [12].

1.3 Інерційні сенсори як основа для розпізнавання жестів

У межах роботи інерційні сенсори розглядаються як ключовий елемент побудови систем жестового керування, оскільки саме вони забезпечують безпосереднє вимірювання рухів і положення об'єкта у просторі [3], [9], [10]. До цієї групи сенсорів належать насамперед акселерометри та гіроскопи, а в сучасних технічних рішеннях найчастіше використовуються інтегровані інерційні модулі, що поєднують у собі кілька вимірювальних каналів [24], [25]. Такі модулі дозволяють одночасно реєструвати лінійні прискорення, кутові швидкості та, в окремих випадках, додаткові параметри, пов'язані з орієнтацією у просторі [29], [41]. Це створює основу для формування повнішої картини руху та подальшої інтерпретації жестів у програмній частині системи [9], [12].

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Акселерометри забезпечують вимірювання прискорень уздовж кількох осей і дозволяють фіксувати як динамічні рухи, так і вплив сили тяжіння, що використовується для визначення нахилу або положення сенсора у просторі [24], [25]. Гіроскопи, у свою чергу, вимірюють кутові швидкості та дають можливість відстежувати обертальні рухи з високою точністю [29], [41]. Поєднання цих двох типів даних дозволяє отримувати більш стабільну та інформативну оцінку рухів руки або іншого керуючого елемента, що є особливо важливим для задач розпізнавання жестів, де значення має не лише сам факт руху, а й його форма, напрям і швидкість [9], [12], [33].

У сучасних інерційних модулях, які широко застосовуються у вбудованих і мобільних системах, вимірювальні елементи поєднані з цифровими інтерфейсами обміну даними, що спрощує їх інтеграцію з мікроконтролерами та іншими обчислювальними платформами [10], [12]. Це дозволяє розглядати такі сенсори як універсальну апаратну основу для побудови компактних і енергоефективних систем жестового керування [9], [10]. У межах кваліфікаційної роботи бакалавра цей підхід є особливо актуальним, оскільки він забезпечує можливість створення прототипу, який не потребує складної оптичної апаратури або потужних обчислювальних ресурсів для обробки відеоданих [6], [9], [33].

Використання інерційних сенсорів для розпізнавання жестів має низку важливих практичних переваг [3], [10], [12]. Передусім відсутня залежність від умов освітлення, фону сцени або наявності візуальних перешкод, що є характерною проблемою для систем, заснованих на комп'ютерному зорі [6], [33]. Крім того, сенсори можуть бути розміщені безпосередньо на руці користувача або вбудовані в керуючий пристрій, що забезпечує стабільність вимірювань і повторюваність результатів [10], [12]. Це дозволяє зосередити основну увагу на програмній інтерпретації сигналів і побудові алгоритмів розпізнавання, не ускладнюючи систему зайвими апаратними компонентами [9], [24].

Разом із тим дані, що надходять від інерційних сенсорів, мають певні особливості, які необхідно враховувати під час побудови системи жестового керування [24], [25], [29]. Вимірювання містять шум, дрейф і похибки, пов'язані з фізичними властивостями сенсорів та умовами їх використання [24], [25]. Це означає, що для коректного розпізнавання жестів необхідно застосовувати попередню обробку сигналів, зокрема фільтрацію та нормалізацію, а також використовувати узгоджені моделі інтерпретації рухів [24], [29], [41]. У межах кваліфікаційної роботи бакалавра ці аспекти розглядаються як невід'ємна частина загальної архітектури програмно-технічного засобу [9], [12].

Інерційні сенсори також дозволяють формувати часові послідовності вимірювань, які відображають динаміку руху, а не лише його окремі стани [3], [33]. Це відкриває можливість розпізнавати складні жести, що складаються з кількох фаз або мають характерну траєкторію у часі [1], [8], [33]. У результаті система може не просто фіксувати окремі положення руки, а інтерпретувати цілісні рухи як осмислені команди керування [9], [12]. Такий підхід добре узгоджується з концепцією кіберфізичних систем, у яких важливу роль відіграє саме динамічна взаємодія між людиною та технічним середовищем [17], [38].

У підсумку інерційні сенсори у межах кваліфікаційної роботи бакалавра розглядаються як доцільна та технологічно виправдана основа для побудови системи розпізнавання жестів [3], [9], [10]. Вони поєднують у собі компактність, відносну простоту апаратної реалізації та достатню інформативність вимірювань для формування керуючих команд у кіберфізичній системі [10], [12], [41]. Це дозволяє створити програмно-технічний засіб, орієнтований на практичне використання, у якому жестове керування реалізується як логічно інтегрована та функціонально завершена частина загальної архітектури системи [1], [9], [12].

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4 Особливості обробки даних інерційних сенсорів у задачах розпізнавання рухів

Первинні вимірювання, що надходять від акселерометрів і гіроскопів, відображають фізичні процеси у вигляді числових послідовностей, однак у такому вигляді вони ще не придатні для безпосереднього використання як керуючі команди [24], [25], [29]. Ці дані містять шум, випадкові коливання та похибки, зумовлені як особливостями самих сенсорів, так і умовами їх експлуатації [24], [25]. Через це перетворення сирих вимірювань у стабільні та інформативні ознаки виступає необхідною умовою коректної роботи всієї системи жестового керування [3], [9], [12].

Однією з основних особливостей даних інерційних сенсорів є їх часовий характер [3], [33]. Кожен жест або рух описується не окремим значенням, а послідовністю вимірювань, що змінюються у часі [33], [49]. Це означає, що під час обробки необхідно враховувати не лише миттєві значення прискорень або кутових швидкостей, а й їхню динаміку, форму та тривалість у часовому інтервалі [1], [33]. Саме ця властивість дозволяє відрізнити схожі за окремими параметрами рухи, але різні за характером виконання, наприклад плавний нахил і різкий ривок [1], [8].

Важливою складовою обробки сигналів є попередня фільтрація, спрямована на зменшення впливу шуму та випадкових коливань [24], [29], [41]. У практичних системах вимірювання інерційних сенсорів часто супроводжуються високочастотними перешкодами, які не несуть корисної інформації про реальний рух [24], [25]. Тому застосування фільтрів дозволяє згладити сигнал і виділити основну тенденцію зміни вимірюваних величин [29], [41]. Такий підхід підвищує стабільність подальшої інтерпретації даних і зменшує ймовірність помилкових спрацьовувань під час розпізнавання жестів [9], [12].

Окрім фільтрації, суттєве значення має нормалізація та масштабування даних [3], [33]. Значення прискорень і кутових швидкостей можуть суттєво відрізнятись за діапазоном і амплітудою залежно від типу руху, швидкості виконання жесту та індивідуальних особливостей користувача [1], [33]. Приведення даних до узгодженого вигляду спрощує подальшу обробку та дозволяє використовувати єдині правила інтерпретації для різних сценаріїв руху [9], [12]. Це особливо важливо для систем, орієнтованих на повторюваність результатів і стабільність роботи в різних умовах [3], [10].

Ще однією характерною особливістю є необхідність виділення інформативних ознак із часових рядів вимірювань [3], [33]. Замість використання всіх сирих даних безпосередньо, зазвичай формується набір характеристик, що краще описують рух у цілому [1], [49]. До таких характеристик можуть належати максимальні та середні значення, швидкість зміни сигналу, тривалість окремих фаз руху або співвідношення між вимірюваннями вздовж різних осей [1], [33]. Використання узагальнених ознак дозволяє спростити логіку розпізнавання та зменшити обчислювальне навантаження на програмну частину системи [9], [12].

Під час обробки даних інерційних сенсорів також враховується наявність накопичувальних похибок, зокрема дрейфу гіроскопів і зміщення нульових рівнів акселерометрів [24], [25], [29]. Ці явища призводять до поступового відхилення вимірювань від реальних значень, що може негативно впливати на точність визначення рухів у тривалій перспективі [25], [29]. Тому в межах системи жестового керування передбачається використання методів корекції та періодичного уточнення базових параметрів, що дозволяє зберігати прийнятний рівень точності без ускладнення апаратної частини [25], [41].

Окремої уваги заслуговує питання сегментації руху, тобто визначення моментів початку та завершення жесту у потоці даних [33], [49]. У реальних умовах сенсор постійно генерує вимірювання, і не кожна зміна сигналу відповідає осмисленій команді [3], [33]. Тому необхідно відокремлювати корисні фрагменти, що відповідають виконанню жесту, від фонових коливань або

випадкових рухів [33], [49]. Реалізація такої логіки дозволяє підвищити надійність розпізнавання та зменшити кількість хибних спрацьовувань [1], [9].

У підсумку обробка даних інерційних сенсорів у задачах розпізнавання рухів розглядається як багатоступеневий процес, що включає фільтрацію, нормалізацію, виділення інформативних ознак і логічну інтерпретацію часових послідовностей вимірювань [3], [9], [12], [33]. Саме узгоджена реалізація цих етапів дозволяє перетворити сирі фізичні вимірювання на стабільні та зрозумілі команди керування, придатні для використання у складі кіберфізичної системи з жестовим інтерфейсом [9], [10], [12].

1.5 Аналіз існуючих програмно-технічних рішень жестового керування та їх обмежень

Проаналізовано наявні програмно-технічні рішення жестового керування, які вже застосовуються у комерційних продуктах і розробницьких платформах. На практиці ці рішення умовно зводяться до трьох великих підходів: оптичне відстеження рук (камери/ІЧ-камери), носимі пристрої з сенсорами (IMU та/або EMG), а також контролери з вбудованими інерційними датчиками, які сприймають рухи як керуючі команди. Кожен підхід має очевидні переваги, але одночасно накладає обмеження, що впливають на точність, стабільність та зручність інтеграції в кіберфізичні системи.

Одним із найбільш відомих прикладів оптичного жестового керування виступає. Це рішення історично орієнтувалося на безконтактну взаємодію через відстеження тіла та рухів, а також підтримувалося набором інструментів для розробників. Зокрема, SDK 2.0 позиціонується як засіб створення застосунків із підтримкою жестів і голосу. Перевага Kinect, який зображено на рисунку 1.1, полягає у відсутності носимих датчиків і доволі природній взаємодії.



Рисунок 1.1 - Microsoft Kinect [57]

Водночас для задач керування технічними системами типові обмеження проявляються досить швидко: потрібна правильна зона огляду, наявність достатнього простору, а також стабільні умови зйомки. У реальних сценаріях (лабораторія, майстерня, виробниче середовище) на точність впливають перекриття рук, сторонні об'єкти в кадрі, обмеження за відстанню та розташуванням сенсора. Крім того, у багатьох задачах потрібні не «загальні жести тілом», а дрібні, точні команди кистю або пальцями, де оптика без спеціалізованих модулів дає нестабільні результати.

Більш «точковим» оптичним рішенням для відстеження рук вважається Leap Motion / Ultraleap, який зображено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Leap Motion / Ultraleap [58]

Платформа базується на інфрачервоних камерах і підсвічуванні, а документація підкреслює, що такий підхід робить трекінг рук більш стійким у різних умовах освітлення.

Це рішення добре підходить для жестів кистю, взаємодії в XR/VR та для сценаріїв, де потрібна підвищена деталізація рухів рук. Але й тут зберігаються характерні обмеження: потрібне розміщення пристрою відносно рук у правильній зоні, жест легко «втрачається», якщо руки виходять з поля зору або перекриваються. Для кіберфізичних систем, які мають працювати поза ідеальними умовами (рух оператора, часткові перекриття, зміна пози), залежність від поля зору залишається критичним фактором.

Окрему групу готових рішень формують носимі пристрої на руці, де основним джерелом даних виступає IMU (а інколи додатково EMG). Показовим прикладом вважається Myo armband (Thalmic Labs), який поєднує інерційний модуль та сенсори електроміографії і має програмні інтерфейси для доступу до даних зображено на рисунку 1.3.

Перевага таких пристроїв полягає у незалежності від освітлення та фону, а також у стабільнішій реєстрації рухів, оскільки датчики розміщені безпосередньо на руці. Водночас обмеження проявляються на рівні експлуатації та інтеграції: необхідність підбору/посадки пристрою, вплив індивідуальних фізіологічних особливостей (особливо для EMG), чутливість до зміщення браслета під час руху, а також залежність точності від калібрування й повторюваності жестів.



Рисунок 1.3 - Myo armband (Thalmic Labs) [59]

Для задач керування кіберфізичними системами це означає, що без правильно організованої обробки сигналів і чітко визначеного набору жестів стабільність розпізнавання може помітно «плавати» між різними користувачами або навіть у межах одного сеансу.

Ще одна практична категорія готових рішень - це масові контролери з інерційними датчиками, які вже багато років застосовуються як інструмент керування рухом.

Найочевидніший приклад - Nintendo Joy-Con, де наявні акселерометр і гіроскоп, а можливість motion control є штатною частиною концепції керування. Сильна сторона такого підходу - доступність, готова апаратна база, непогана чутливість сенсорів і відпрацьовані сценарії «жест - дія» в ігрових системах. Проте для завдань керування кіберфізичними системами виникають обмеження іншого типу: контролер орієнтований на конкретні екосистеми, а не на універсальну інженерну інтеграцію; крім того, інтерпретація жестів у таких пристроях часто «зашита» під типові ігрові механіки, а не під формальні команди керування виконавчими модулями.

У підсумку використання подібних контролерів як універсального «жестового пульта» у технічних системах зазвичай потребує додаткових програмних прошарків, перетворення протоколів і адаптації даних під власні алгоритми.

Окремо варто відзначити сучасні XR-пристрої, де жестове керування реалізується на рівні платформи. Наприклад, у Meta Quest hand tracking працює на основі камер гарнітури, а в документації прямо описано, що руки використовуються як метод введення, з типовими жестами на кшталт pinch/poke/drag для взаємодії з інтерфейсом зображено на рисунку 1.4.

Подібні платформи виглядають дуже привабливо завдяки «готовому» досвіду користування й стандартним жестам, однак їх обмеження для кіберфізичних задач очевидні: робота зав'язана на конкретний пристрій, його камери та програмне середовище, а стабільність сильно залежить від положення

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рук у зоні видимості камер, перекриттів, а також від зовнішніх факторів (наприклад, аксесуари на руках можуть впливати на якість відстеження, що прямо зазначається і в контексті інших платформ на кшталт Vision Pro).



Рисунок 1.4 - Meta Quest [60]

Для інженерної системи, яка має бути компактною і працювати «поза шоломом», це створює суттєві обмеження. Аналіз готових рішень показує, що оптичні системи забезпечують природну взаємодію без носимих датчиків, але залишаються прив'язаними до поля зору та умов сцени. Носимі рішення на базі IMU/EMG дають автономність і кращу повторюваність у різних середовищах, але висувають вимоги до калібрування, стабільності кріплення та коректної обробки сигналів. Контролери з інерційними сенсорами вже довели працездатність motion-керування в масових продуктах, проте часто обмежені екосистемою й потребують адаптації для задач кіберфізичного керування. Саме ці обмеження підводять до логіки вибору інерційних сенсорів як основи програмно-технічного засобу.

1.6 Висновок до першого розділу

У першому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи проаналізовано теоретичні основи побудови програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів. Розглянуто особливості кіберфізичних систем, у яких програмні, апаратні та фізичні компоненти працюють як єдине середовище. Показано, що важливою складовою таких систем є людино-машинний інтерфейс, оскільки саме через нього користувач передає команди та отримує інформацію про стан керованого об'єкта.

У межах аналізу встановлено, що традиційні способи керування, засновані на кнопках, перемикачах, клавіатурах або сенсорних екранах, не завжди є зручними для динамічних технічних систем. Вони можуть обмежувати швидкість взаємодії, потребувати фізичного контакту та ускладнювати роботу в умовах, де потрібна мобільність або швидке реагування. Через це жестове керування розглянуто як один із перспективних напрямів розвитку людино-машинних інтерфейсів, оскільки воно дозволяє перетворювати природні рухи користувача на керуючі команди.

Проаналізовано основні підходи до реалізації жестового керування технічними системами. Оптичні рішення на основі камер і комп'ютерного зору забезпечують безконтактну взаємодію, проте залежать від освітлення, фону, положення користувача та наявності перешкод. Спеціалізовані рукавички й контролери дають змогу точніше фіксувати рухи кисті та пальців, але потребують додаткового обладнання, налаштування та можуть бути незручними у тривалому використанні. На цьому фоні інерційні сенсори мають низку практичних переваг, зокрема компактність, автономність, незалежність від освітлення та простішу інтеграцію з мікроконтролерними платформами.

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБЛЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ ТА МОДЕЛІ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ ЖЕСТОВОГО КЕРУВАННЯ

2.1 Формування загальної концепції жестового керування кіберфізичною системою

Сформовано загальну концепцію програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів. Основна ідея такого засобу полягає в тому, що природний рух руки користувача перетворюється на керуючу команду, яка далі передається до кіберфізичної системи та викликає відповідну реакцію її виконавчих елементів. На відміну від традиційних способів керування, де для подання команди використовуються кнопки, перемикачі або сенсорний екран, у запропонованій концепції основним джерелом команди виступає жест. Це дозволяє зробити взаємодію з технічною системою більш природною, швидкою та зручною, особливо в тих умовах, де оператору складно або незручно постійно використовувати фізичні органи керування.

Концепція жестового керування побудована навколо використання інерційного модуля, який фіксує зміну положення, нахилу та руху руки у просторі. У складі такого модуля передбачено використання акселерометра та гіроскопа, що дозволяють отримувати дані про лінійні прискорення та кутові швидкості. Завдяки цьому система не потребує камери, стабільного освітлення або спеціально підготовленого фону. Команда формується не за зовнішнім зображенням жесту, а за характером зміни вимірюваних фізичних величин у часі. Саме це робить обраний підхід придатним для компактної кіберфізичної системи, у якій важливими є простота апаратної частини, мобільність і можливість роботи в різних умовах експлуатації.

У запропонованій концепції жест розглядається як послідовність змін параметрів, отриманих від інерційного сенсора. Рух руки вгору, вниз, убік, поворот або різкий нахил не сприймається системою як окреме випадкове

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значення, а аналізується як короткий часовий фрагмент із певною формою сигналу. Через це важливою частиною концепції стало не лише зчитування даних, а й їх попереднє впорядкування, фільтрація та перетворення у зрозумілі ознаки. Такий підхід дозволяє відокремити корисний рух від випадкових коливань і зменшити кількість хибних спрацьовувань.

Загальна логіка роботи програмно-технічного засобу передбачає кілька послідовних етапів. Спочатку користувач виконує жест, після чого інерційний сенсор реєструє відповідні зміни прискорень і кутових швидкостей. Далі мікроконтролер отримує ці дані через цифровий інтерфейс, виконує їх первинну обробку та передає до програмного блока розпізнавання. У цьому блоці значення порівнюються із заданими умовами або шаблонами рухів, після чого формується команда керування. На завершальному етапі команда передається до виконавчої частини кіберфізичної системи, яка змінює свій стан відповідно до розпізнаного жесту.

Для цього підрозділу доцільно використати один узагальнювальний рисунок, який показує не електричні з'єднання, а саме концепцію проходження команди від людини до керованого об'єкта.

На рисунку 2.1 зображено загальну послідовність перетворення жесту користувача у керуючу дію кіберфізичної системи. У схемі показано, що початковим елементом виступає користувач, який виконує рух рукою або керуючим модулем. Далі інерційний сенсор реєструє параметри цього руху та передає їх до мікроконтролера. У мікроконтролері вже передбачено блоки попередньої обробки, розпізнавання жесту та формування команди. Після цього команда надходить до керованої частини кіберфізичної системи, де виконавчий елемент змінює стан, напрям руху, режим роботи або інший параметр залежно від закладеної логіки. Таке подання дозволяє наочно показати, що жестове керування є не окремою допоміжною функцією, а повним ланцюгом взаємодії між людиною, сенсорним модулем, програмною логікою та фізичним об'єктом.

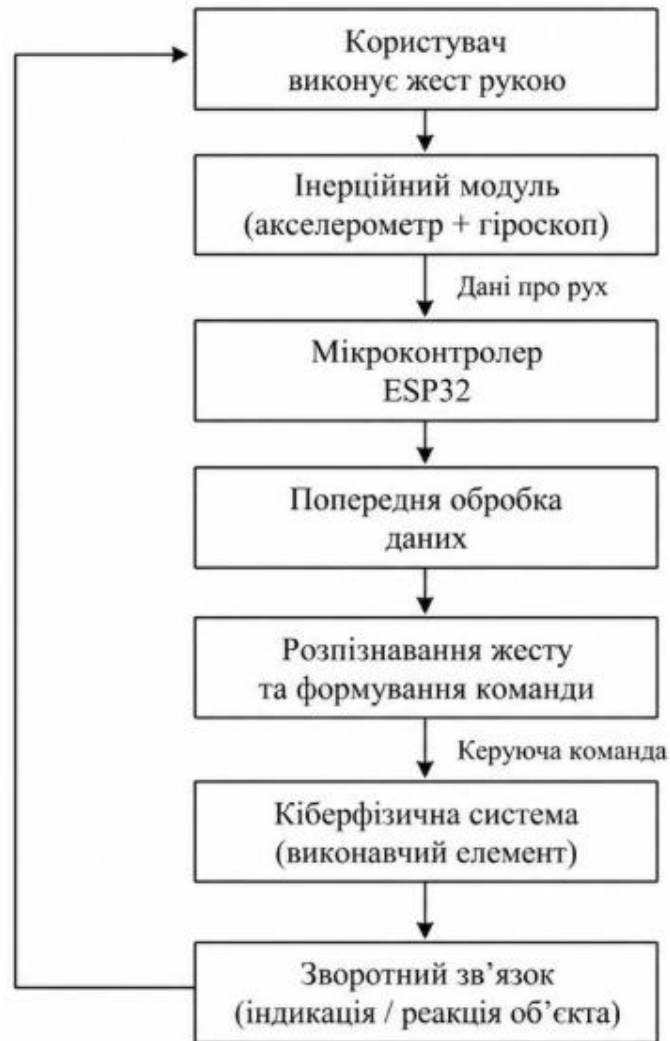


Рисунок 2.1 – Концептуальна схема жестового керування кіберфізичною системою

У межах концепції також передбачено наявність зворотного зв'язку, оскільки користувач має розуміти, що жест розпізнано правильно, а команда виконана системою. Такий зворотний зв'язок може реалізовуватися через світлодіодну індикацію, звуковий сигнал, зміну положення виконавчого механізму або відображення стану в інтерфейсі. Наявність такого елемента підвищує зрозумілість роботи системи та дозволяє швидко виявляти ситуації, коли жест виконано неточно або команда не була прийнята. Для бакалаврської кваліфікаційної роботи це має практичне значення, оскільки система повинна не

лише технічно обробляти дані, а й залишатися зрозумілою для користувача під час демонстрації та перевірки роботи.

Важливою особливістю сформованої концепції є поділ системи на сенсорний, обчислювальний і виконавчий рівні. Сенсорний рівень відповідає за збирання даних про рух. Обчислювальний рівень виконує фільтрацію, аналіз і прийняття рішення щодо того, який саме жест виконано. Виконавчий рівень реалізує фізичну реакцію кіберфізичної системи на розпізнану команду. Такий поділ спрощує подальше проєктування, оскільки кожен рівень має чітке призначення та може розглядатися окремо під час вибору компонентів, розроблення алгоритму та практичної реалізації.

У межах запропонованого підходу набір жестів має бути обмеженим, зрозумілим і достатньо відмінним між собою. Це потрібно для того, щоб система могла стабільно відрізнати одну команду від іншої без складних обчислювальних моделей і надмірного навантаження на мікроконтролер. Наприклад, для демонстраційної кіберфізичної системи можуть бути передбачені жести, що відповідають запуску, зупинці, зміні напрямку, перемиканню режиму або активації окремого виконавчого елемента. Такий підхід дозволяє не перевантажувати систему зайвою кількістю команд і водночас показати основний принцип жестового керування.

Сформована концепція також враховує обмежені ресурси вбудованих систем. Оскільки мікроконтролер має обмежений обсяг пам'яті та продуктивність, основна логіка розпізнавання має бути достатньо простою, передбачуваною та придатною для роботи в реальному часі. Через це на початковому етапі доцільно використовувати правила, порогові значення та часові вікна, які дозволяють розпізнавати базові жести без застосування складних нейромережових моделей. Такий варіант краще відповідає практичній спрямованості бакалаврської роботи, оскільки дозволяє отримати працездатний програмно-технічний засіб із прозорою логікою роботи.

2.2 Визначення складу апаратних компонентів та їх функціонального призначення

Визначено склад апаратних компонентів, необхідних для побудови програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів. Основна вимога до апаратної частини полягає в тому, щоб вона забезпечувала стабільне зчитування рухів користувача, попередню обробку отриманих даних, формування керуючої команди та передавання цієї команди до виконавчої частини системи. Через це апаратний склад сформовано не як набір окремих випадкових модулів, а як взаємопов'язану систему, у якій кожен елемент виконує конкретну функцію.

Основою апаратної частини обрано мікроконтролерний модуль, який виконує роль центрального блока керування. Саме він приймає дані від інерційного сенсора, виконує їх первинну обробку, порівнює отримані значення з умовами розпізнавання жестів і формує сигнал для виконавчого елемента. У такій системі мікроконтролер є проміжною ланкою між рухом користувача та фізичною реакцією кіберфізичної системи. Для реалізації прототипу доцільно використати модуль ESP32, оскільки він поєднує достатню обчислювальну продуктивність, невеликі розміри, доступність, підтримку цифрових інтерфейсів і можливість подальшого розширення системи за рахунок бездротового зв'язку.

Використання ESP32 у складі програмно-технічного засобу дозволяє не обмежувати систему лише локальним керуванням через дротові з'єднання. Наявність вбудованих Wi-Fi та Bluetooth-модулів створює можливість подальшої передачі команд або станів системи на зовнішній пристрій, вебінтерфейс чи іншу частину кіберфізичного комплексу. Навіть якщо на базовому етапі реалізації керування здійснюється безпосередньо через виводи мікроконтролера, вибір такої платформи залишає простір для масштабування. Це важливо для бакалаврської кваліфікаційної роботи, оскільки апаратна частина має не лише виконувати поточне завдання, а й демонструвати можливість подальшого розвитку.

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ключовим сенсорним елементом системи визначено інерційний модуль MPU-6050 або аналогічний IMU-модуль, який поєднує акселерометр і гіроскоп. Акселерометр дає змогу фіксувати прискорення вздовж трьох осей, а гіроскоп дозволяє визначати кутові швидкості під час обертальних рухів. У сукупності ці дані створюють основу для розпізнавання нахилів, поворотів, різких рухів, переміщень руки та інших жестів, які можуть бути використані як команди керування. Такий модуль підключається до мікроконтролера через цифровий інтерфейс I2C, що спрощує з'єднання та зменшує кількість необхідних провідників.

Інерційний сенсор у цій системі виконує роль первинного джерела інформації про рух. Якщо у традиційній системі команда може подаватися натисканням кнопки, то в запропонованому рішенні командою виступає зміна положення сенсора у просторі. Це означає, що апаратна частина повинна забезпечити достатню стабільність зчитування та мінімальний вплив випадкових коливань. Саме тому інерційний модуль доцільно розміщувати у невеликому корпусі або на керуючому модулі, який зручно тримати в руці. Такий варіант дозволяє отримати повторювані рухи та зменшити ймовірність випадкового зміщення датчика під час роботи.

Виконавча частина кіберфізичної системи у межах демонстраційного прототипу може бути представлена сервоприводом, світлодіодною індикацією або іншим простим фізичним елементом, який змінює свій стан після отримання команди. Найбільш наочним варіантом для такої роботи є використання сервопривода, оскільки він дозволяє показати фізичну реакцію системи на жест користувача. Наприклад, нахил руки вліво може відповідати повороту сервопривода в один бік, нахил вправо - повороту в інший бік, різкий рух - зміні режиму або поверненню у початкове положення. Це дає змогу чітко продемонструвати зв'язок між жестом, програмною обробкою та фізичною дією.

Для індикації стану системи передбачено використання світлодіодів або звукового сигналізатора. Такі елементи не є основними для розпізнавання

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

жестів, однак вони підвищують зручність перевірки роботи прототипу. Світлодіод може показувати, що система увімкнена, що сенсор передає дані або що жест успішно розпізнано. Звуковий сигналізатор може використовуватися для короткого підтвердження прийнятої команди. Завдяки цьому користувач отримує зрозумілий зворотний зв'язок, а під час тестування простіше визначити, на якому етапі виникла помилка: під час зчитування даних, розпізнавання жесту чи виконання команди.

Живлення апаратної частини може здійснюватися через USB-підключення або від автономного джерела живлення. На етапі налагодження зручним є живлення від USB, оскільки воно одночасно забезпечує програмування мікроконтролера та обмін даними з комп'ютером. Для автономного варіанта може бути передбачено використання акумуляторного блока або стабілізованого джерела живлення. При цьому важливо враховувати, що мікроконтролер, інерційний сенсор і виконавчі елементи можуть мати різні вимоги до напруги та струму, тому в схемі має бути забезпечено коректне підключення живлення.

Для збирання прототипу також передбачено використання макетної плати, з'єднувальних провідників, резисторів для світлодіодів та, за потреби, окремого живлення для виконавчого механізму. Ці компоненти не виконують самостійної логічної функції, однак забезпечують фізичне з'єднання всіх модулів у єдину систему. На етапі створення бакалаврського прототипу такий підхід є зручним, оскільки дозволяє швидко змінювати підключення, перевіряти окремі модулі та поступово переходити від тестової схеми до більш упорядкованого апаратного виконання.

У таблиці 2.1 подано основні апаратні компоненти, які використано для формування функціональної основи програмно-технічного засобу жестового керування. У таблиці показано, що кожен компонент має чітко визначене призначення та пов'язаний із певним етапом роботи системи. Мікроконтролер відповідає за обчислювальну та керуючу частину, інерційний модуль забезпечує отримання даних про рух, виконавчий елемент демонструє реакцію

кіберфізичної системи, а засоби індикації формують зворотний зв'язок для користувача. Це дозволяє представити апаратну частину як цілісну систему, а не як набір ізольованих деталей.

Таблиця 2.1 – Основні апаратні компоненти програмно-технічного засобу жестового керування та їх призначення

Апаратний компонент	Функціональне призначення
Мікроконтролер ESP32	Приймає дані від інерційного сенсора, виконує обробку, розпізнає жести та формує керуючі сигнали
Інерційний модуль MPU-6050	Вимірює прискорення та кутові швидкості руху керуючого модуля
Сервопривод SG90 або аналог	Виконує фізичну дію у відповідь на розпізнаний жест
Світлодіоди	Відображають стан системи, режим роботи або факт розпізнавання команди
Звуковий сигналізатор	Забезпечує простий зворотний зв'язок під час прийняття команди
Макетна плата та провідники	Забезпечують з'єднання апаратних компонентів у складі прототипу
Джерело живлення	Подає напругу на мікроконтролер, сенсорний модуль і виконавчі елементи

Для візуального пояснення складу апаратної частини доцільно додати один рисунок, на якому показано функціональне призначення кожного апаратного блока та напрям руху сигналів між ними.

На рисунку 2.2 зображено функціональний розподіл апаратних компонентів засобу жестового керування. У схемі показано, що інерційний модуль передає дані про рух до мікроконтролера ESP32, який виконує обробку

вимірювань і формує команду для виконавчого елемента. Окремо подано блок індикації, який повідомляє про стан системи та підтверджує виконання команди. Також у схемі показано джерело живлення, що забезпечує роботу всіх компонентів. Таке подання дозволяє зрозуміти роль кожного апаратного елемента та показує, що система побудована за простою, але логічно завершеною структурою.



Рисунок 2.2 – Функціональний розподіл апаратних компонентів засобу жестового керування

Визначений склад апаратних компонентів відповідає основній ідеї роботи: створити компактний засіб, який перетворює рух користувача на керуючу дію кіберфізичної системи. Обрані компоненти є доступними, поширеними та придатними для швидкого створення прототипу. При цьому система не вимагає використання складної оптичної апаратури, додаткових камер або високопродуктивних обчислювальних пристроїв. Основна функціональність досягається за рахунок поєднання інерційного сенсора, мікроконтролера та простої виконавчої частини.

2.3 Побудова моделі взаємодії інерційного сенсора, мікроконтролера та керованого об'єкта

Побудовано модель взаємодії інерційного сенсора, мікроконтролера та керованого об'єкта, яка відображає основний принцип роботи програмно-технічного засобу жестового керування. У цій моделі кожен елемент виконує окрему функцію, але кінцевий результат досягається лише за умови їх узгодженої роботи. Інерційний сенсор виступає джерелом первинних даних про рух користувача, мікроконтролер виконує обробку цих даних і приймає рішення щодо команди, а керований об'єкт реалізує фізичну дію відповідно до розпізнаного жесту.

Побудована модель ґрунтується на послідовному проходженні інформації від фізичного руху до керуючого впливу. Спочатку користувач змінює положення керуючого модуля у просторі, наприклад нахиляє його вліво, вправо, вперед, назад або виконує короткий різкий рух. Ця дія викликає зміну прискорень і кутових швидкостей, які реєструються інерційним модулем. Далі отримані значення передаються до мікроконтролера, де вони обробляються програмними засобами. Після цього система визначає, чи відповідає зафіксований рух одному із заданих жестів, і формує відповідний сигнал для виконавчої частини.

Інерційний сенсор у межах моделі виконує функцію вимірювального блока. Його основне призначення полягає у фіксації зміни положення та характеру руху керуючого модуля. Для цього використовується акселерометр, який вимірює прискорення вздовж осей, і гіроскоп, який фіксує кутові швидкості. Таке поєднання дозволяє отримати не лише інформацію про напрям переміщення, а й про інтенсивність та динаміку жесту. У практичній реалізації ці дані надходять до мікроконтролера через цифровий інтерфейс, що спрощує підключення сенсорного модуля та забезпечує стабільний обмін вимірюваннями.

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мікроконтролер у запропонованій моделі є центральним елементом обробки та прийняття рішення. Він не просто приймає числові значення від сенсора, а виконує їх попереднє впорядкування, відкидання незначних коливань і порівняння з умовами, закладеними у програмній логіці. На цьому етапі сирі дані перетворюються на ознаки, які мають практичне значення для розпізнавання жестів. Наприклад, якщо нахил керуючого модуля перевищує встановлений поріг у певному напрямку, система може трактувати це як команду повороту або зміни стану керованого об'єкта. Якщо зафіксовано різкий рух, він може бути використаний як команда запуску, зупинки або перемикання режиму.

Керований об'єкт у моделі виконує роль фізичної частини кіберфізичної системи, на яку спрямована команда. У демонстраційному варіанті таким об'єктом може виступати сервопривод, світлодіодний модуль, мотор, реле або інший виконавчий елемент, що змінює свій стан після отримання сигналу від мікроконтролера. Саме на цьому етапі цифрова команда перетворюється на фізичну дію. Це дозволяє показати головну особливість кіберфізичної системи: програмне рішення безпосередньо впливає на реальний об'єкт, а результат цього впливу можна спостерігати у вигляді руху, зміни положення, світлової індикації або іншої реакції.

Для цього підрозділу доцільно використати один рисунок, який показує модель взаємодії між сенсором, мікроконтролером і керованим об'єктом. Такий рисунок не дублює загальну концептуальну схему з попереднього підрозділу, оскільки тут увагу зосереджено не на ролі користувача, а саме на внутрішній логіці обміну даними між основними технічними блоками системи.

На рисунку 2.3 зображено модель взаємодії основних апаратно-програмних елементів засобу жестового керування. У схемі показано, що інерційний сенсор передає до мікроконтролера потік даних про прискорення та кутові швидкості. У мікроконтролері передбачено послідовне виконання етапів приймання даних, попередньої обробки, визначення жесту та формування команди. Після цього сформований керуючий сигнал передається до керованого

об'єкта, який виконує фізичну дію. Окремо у схемі показано зворотний зв'язок у вигляді індикації або зміни стану об'єкта, що дозволяє підтвердити виконання команди.



Рисунок 2.3 – Модель взаємодії інерційного сенсора, мікроконтролера та керованого об'єкта

Модель взаємодії побудовано за принципом «сенсор – обробка – дія». Такий принцип добре відповідає логіці кіберфізичних систем, оскільки поєднує вимірювання фізичного руху, програмну інтерпретацію та реакцію реального об'єкта. На першому рівні система отримує дані від навколишнього фізичного середовища, у цьому випадку від руху руки користувача. На другому рівні ці дані аналізуються мікроконтролером. На третьому рівні результат аналізу використовується для зміни стану керованого об'єкта. Завдяки цьому сформовано цілісний ланцюг керування, у якому кожен наступний етап залежить від результату попереднього.

Важливою властивістю побудованої моделі є розділення потоків даних і потоків керування. Потік даних формується інерційним сенсором і містить вимірювання, які ще не є командами. Потік керування формується вже після

обробки цих вимірювань мікроконтролером. Такий поділ дозволяє уникнути ситуації, коли кожне випадкове коливання сенсора сприймається як дія користувача. Спочатку система перевіряє, чи має рух достатню амплітуду, напрям і тривалість, а лише потім формує команду. Це підвищує стабільність роботи та зменшує кількість хибних спрацьовувань.

У межах моделі також враховано потребу в часовій обробці сигналів. Оскільки жест не є одиничним числовим значенням, а являє собою коротку послідовність змін параметрів, мікроконтролер має аналізувати дані не ізольовано, а в межах певного часового проміжку. Такий підхід дозволяє відрізнити просте утримання модуля під нахилом від активного жесту. Наприклад, повільне зміщення руки може ігноруватися як незначна зміна положення, а швидкий нахил у визначеному напрямку може розпізнаватися як команда. У результаті модель стає більш наближеною до реальних умов використання, де рухи користувача не завжди є ідеально точними та повторюваними.

Окрему роль у моделі відіграє зворотний зв'язок. Після виконання команди керований об'єкт або блок індикації має показати користувачу, що дія прийнята та виконана. Це може бути поворот сервопривода, зміна стану світлодіода, короткий звуковий сигнал або відображення нового стану у програмному інтерфейсі. Наявність такого зворотного зв'язку робить систему зрозумілішою під час експлуатації та тестування. Якщо після виконання жесту реакція відсутня, можна швидко визначити, що помилка виникла на одному з етапів: під час зчитування даних, їх обробки, розпізнавання або передавання команди.

Побудована модель також дозволяє спростити подальшу реалізацію програмної частини. Оскільки кожен блок має чітко визначену роль, програму можна умовно поділити на окремі частини: ініціалізацію сенсора, зчитування вимірювань, фільтрацію, перевірку умов розпізнавання, формування команди та керування виконавчим елементом. Такий поділ робить логіку програми більш прозорою, полегшує налагодження та дозволяє поетапно перевіряти

працездатність системи. Спочатку може перевірятися правильність надходження даних від сенсора, потім стабільність їх обробки, а вже після цього - реакція керованого об'єкта.

2.4 Організація потоку даних від інерційного модуля до блока прийняття керуючого рішення

Організовано потік даних від інерційного модуля до блока прийняття керуючого рішення, що є одним із центральних етапів проектування програмно-технічного засобу жестового керування. Саме на цьому етапі фізичний рух користувача поступово перетворюється на впорядкований набір цифрових значень, придатних для подальшої обробки та визначення команди. Якщо в попередньому підрозділі увагу зосереджено на загальній моделі взаємодії сенсора, мікроконтролера та керованого об'єкта, то в цьому підрозділі розкрито внутрішню логіку проходження даних у межах мікроконтролерної частини системи.

Потік даних у запропонованій системі починається з інерційного модуля, який фіксує зміну положення керуючого пристрою у просторі. Під час виконання жесту акселерометр і гіроскоп формують значення прискорень та кутових швидкостей за відповідними осями. Ці значення ще не є готовими командами, оскільки вони відображають лише фізичні параметри руху. Для того щоб система могла використати їх у керуванні, дані мають пройти послідовну обробку, у межах якої відокремлюються корисні зміни від випадкових коливань, шумів і нестабільних вимірювань.

Передавання даних від інерційного модуля до мікроконтролера організовано через цифровий інтерфейс обміну. У типовій реалізації для такого зв'язку використано інтерфейс I2C, який дозволяє передавати вимірювання від сенсора до ESP32 або іншого мікроконтролерного модуля за допомогою невеликої кількості провідників. Це спрощує апаратну структуру системи та

зменшує кількість з'єднань між компонентами. У межах програмної логіки мікроконтролер періодично звертається до сенсора, отримує актуальні значення вимірювань і передає їх на етап попередньої обробки.

Організація потоку даних передбачає, що вимірювання надходять не хаотично, а у вигляді послідовних пакетів. Кожен такий пакет містить значення прискорень за трьома осями та значення кутових швидкостей за трьома осями. У результаті формується короткий цифровий опис поточного стану керуючого модуля. Якщо такі пакети збираються з певною періодичністю, система отримує не лише окремі миттєві значення, а часову послідовність, яка вже відображає характер руху. Саме ця послідовність стає основою для подальшого визначення жесту.

На першому етапі після приймання даних виконано їх первинну перевірку. У межах цього процесу відкидаються явно некоректні значення, які можуть виникати через короткочасні збої зчитування або нестабільне підключення сенсора. Також перевіряється наявність зв'язку між мікроконтролером та інерційним модулем. Якщо дані не надходять або мають неправильний формат, система не повинна формувати керуючу команду, оскільки це може призвести до помилкової реакції виконавчого елемента. Такий підхід дозволяє зробити роботу системи більш передбачуваною.

Наступним етапом організовано попередню фільтрацію вимірювань. Інерційні сенсори формують дані, які можуть містити шум, дрібні коливання та короткі випадкові відхилення. У задачі жестового керування такі зміни не завжди мають смислове значення. Наприклад, легке тремтіння руки або незначний нахил керуючого модуля не повинні сприйматися як повноцінна команда. Через це перед блоком прийняття рішення дані згладжуються або порівнюються з мінімальними пороговими значеннями. Це дозволяє залишити в потоці лише ті зміни, які можуть відповідати реальному жесту користувача.

Після фільтрації дані переходять до етапу нормалізації та приведення до зручного для обробки вигляду. Значення, отримані від акселерометра та

гіроскопа, можуть мати різну амплітуду та різні одиниці вимірювання. Для зручності подальшого аналізу ці значення упорядковуються, за потреби масштабуються та подаються у вигляді набору параметрів, що описують поточний рух. У цьому вигляді дані вже можуть використовуватися для порівняння з умовами розпізнавання жестів. Завдяки такій організації потоку програмна частина не працює безпосередньо з необробленими значеннями, а отримує більш стабільну та зрозумілу інформацію.

Важливим елементом потоку даних є формування короткого часового вікна. Окреме значення прискорення або кутової швидкості не завжди дозволяє однозначно визначити жест, оскільки рух має тривалість і форму. Наприклад, нахил вправо може складатися з початкового прискорення, зміни кута та подальшого утримання положення. Тому в системі передбачено накопичення кількох послідовних вимірювань, які разом утворюють фрагмент руху. Саме такий фрагмент передається до блока прийняття керуючого рішення, де вже виконується перевірка відповідності певному жесту.

Блок прийняття керуючого рішення працює з підготовленими даними, які пройшли попередні етапи обробки. У цьому блоці визначається, чи відповідає поточний рух одному із закладених сценаріїв. Для базового прототипу доцільною є порогова логіка, коли жест визначається за перевищенням певних значень прискорення, кутової швидкості або кута нахилу в конкретному напрямку. Наприклад, якщо значення за однією з осей стабільно перевищує встановлений поріг протягом короткого проміжку часу, система може сформулювати команду повороту, перемикання режиму або активації виконавчого елемента.

У межах організованого потоку даних також передбачено захист від повторного спрацьовування. Якщо жест уже розпізнано і команда сформована, система має короткий час не реагувати на залишкові коливання, які виникають після руху руки. Без такого обмеження один жест може бути помилково сприйнятий як кілька однакових команд підряд. Для цього в логіці потоку

передбачено часову затримку або стан очікування, після якого система повертається до приймання нових вимірювань. Це підвищує стабільність керування та робить реакцію системи більш зрозумілою.

Для наочного подання організації потоку даних у підрозділі розміщено схему, яка показує послідовність проходження інформації від сенсора до блока прийняття рішення.

На рисунку 2.4 зображено послідовність проходження даних у програмно-технічному засобі жестового керування. У схемі показано, що інерційний модуль формує первинні вимірювання прискорення та кутової швидкості, після чого вони передаються до мікроконтролера. У мікроконтролері вже реалізовано етапи приймання даних, перевірки коректності, фільтрації, нормалізації та формування часового вікна руху. Після цього підготовлені дані надходять до блока прийняття керуючого рішення, де визначається відповідність руху одному із заданих жестів. У результаті схема показує, що команда керування формується не одразу після зчитування сенсора, а лише після послідовної обробки та перевірки отриманих вимірювань.

Сформована організація потоку даних дозволяє відокремити етапи вимірювання, підготовки та прийняття рішення. Такий поділ є важливим, оскільки кожен етап має власне призначення і зменшує ризик неправильного спрацювання системи. Сенсорний етап відповідає лише за отримання фізичних параметрів руху. Етап обробки забезпечує підготовку даних до аналізу. Блок прийняття рішення вже працює з узгодженими значеннями та формує команду лише тоді, коли рух відповідає заданим умовам. Завдяки цьому система не реагує на кожне випадкове коливання, а виконує керуючу дію лише після розпізнавання осмисленого жесту.

Окремо враховано те, що потік даних має працювати в режимі, близькому до реального часу. Жестове керування втрачає практичний сенс, якщо між рухом користувача та реакцією системи виникає помітна затримка.



Рисунок 2.4 – Схема організації потоку даних від інерційного модуля до блока прийняття керуючого рішення

Через це всі етапи обробки мають бути достатньо простими та швидкими для виконання на мікроконтролері. У межах запропонованої концепції використання фільтрації, порогових умов і часових вікон дозволяє досягти прийнятної швидкодії без застосування складних обчислювальних моделей. Це добре відповідає практичному характеру бакалаврської кваліфікаційної роботи, у якій важливо показати працездатність засобу на доступній апаратній основі.

2.5 Розроблення логіки перетворення рухів користувача у керуючі команди

розроблено логіку перетворення рухів користувача у керуючі команди кіберфізичної системи. Цей етап є центральним у роботі програмно-технічного

засобу жестового керування, оскільки саме тут дані, отримані від інерційного сенсора, набувають практичного змісту. Первинні вимірювання акселерометра та гіроскопа самі по собі не є командами, адже вони лише описують зміну положення, прискорення та обертання керуючого модуля у просторі. Для того щоб система могла виконати конкретну дію, ці вимірювання необхідно перетворити на зрозуміле керуюче рішення.

Основу логіки перетворення рухів сформовано за принципом розпізнавання обмеженого набору базових жестів. Такий підхід обрано через те, що бакалаврський програмно-технічний засіб має бути достатньо простим, стабільним і придатним для реалізації на мікроконтролері без застосування складних обчислювальних моделей. У системі не передбачено розпізнавання великої кількості подібних рухів, оскільки це могло б ускладнити програмну частину та збільшити ймовірність помилкових спрацьовувань. Замість цього сформовано набір жестів, які добре відрізняються між собою за напрямом, амплітудою та характером виконання.

У запропонованій логіці кожен жест пов'язано з певною керуючою командою. Наприклад, нахил керуючого модуля вліво може відповідати команді повороту або переміщення керованого об'єкта вліво, нахил вправо - команді руху вправо, нахил уперед - активації певного режиму, а нахил назад - зупинці або поверненню до початкового стану. Окремо може бути передбачено різкий короткий рух, який використовується для перемикання режиму або підтвердження дії. Така відповідність між жестом і командою робить систему зрозумілою для користувача та спрощує демонстрацію її роботи.

Для розпізнавання жестів використано порогову логіку. Її суть полягає в тому, що система постійно аналізує значення, отримані від інерційного модуля, і перевіряє, чи перевищують вони встановлені межі. Якщо зміна параметра залишається в межах невеликої зони, рух вважається фоновим або випадковим. Якщо ж значення за певною віссю перевищує заданий поріг і утримується протягом короткого проміжку часу, система інтерпретує це як осмислений жест.

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такий підхід дозволяє відокремити реальні команди від легкого тремтіння руки або незначного зміщення керуючого пристрою.

У логіці перетворення рухів передбачено використання нейтрального стану. Нейтральним вважається положення, у якому керуючий модуль не виконує активного жесту, а значення прискорень і кутових швидкостей перебувають у допустимих межах.

Цей стан необхідний для стабільної роботи системи, оскільки він дозволяє відрізнити готовність до приймання нової команди від моменту активного виконання руху. Якщо нейтральний стан не врахувати, система може помилково реагувати на повільні зміни положення або залишкові коливання після попереднього жесту.

Окрему роль у розробленій логіці відіграє поняття «мертвої зони». Під цим розуміється діапазон значень, у межах якого зміна положення не сприймається як команда. Наприклад, якщо користувач незначно змістив руку або тримає керуючий модуль не зовсім рівно, система не повинна одразу формувати керуючий сигнал.

Завдяки введенню такої зони підвищено стійкість роботи програмно-технічного засобу та зменшено кількість випадкових спрацьовувань. Це особливо важливо для жестового керування, оскільки рухи людини не є абсолютно точними та завжди містять певні малі відхилення.

Для визначення жесту також враховано напрям зміни сигналу. Саме напрям дозволяє відрізнити, наприклад, нахил вліво від нахилу вправо або рух уперед від руху назад. У програмній логіці це реалізовано через аналіз знаку та величини значення за відповідною віссю. Якщо значення перевищує додатний поріг, система може визначити один напрям руху, якщо від'ємний - протилежний. Завдяки цьому одна й та сама вісь інерційного сенсора може використовуватися для формування двох різних команд, що спрощує апаратну частину та робить керування більш гнучким.

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім напряму, у логіці розпізнавання враховано тривалість руху. Окремий короткий стрибок значення не завжди означає, що користувач справді виконав командний жест. Він може бути наслідком випадкового поштовху або шуму сенсора. Тому команда формується лише тоді, коли умови розпізнавання виконуються протягом визначеного мінімального часу або в межах кількох послідовних вимірювань. Такий підхід підвищує надійність прийняття рішення та дозволяє зробити реакцію системи більш передбачуваною.

Після визначення жесту система формує керуючу команду. Команда не передається безпосередньо як сире значення з сенсора, а подається у вигляді умовного стану або керуючого сигналу. Наприклад, розпізнаний жест «нахил вліво» може бути перетворений на команду LEFT, жест «нахил вправо» - на команду RIGHT, жест «нахил уперед» - на команду START, а жест «нахил назад» - на команду STOP. У практичній реалізації такі команди можуть бути використані для керування сервоприводом, світлодіодною індикацією, реле, мотором або іншим виконавчим елементом кіберфізичної системи.

Важливим елементом логіки виступає захист від повторного спрацьовування. Після того як жест розпізнано і команда сформована, система переходить у короткий стан очікування. Це потрібно для того, щоб один і той самий рух не був сприйнятий кілька разів підряд.

Наприклад, якщо користувач нахилив модуль вправо і на мить утримав його в цьому положенні, без захисту від повторного спрацьовування мікроконтролер міг би сформувати декілька однакових команд. Запровадження короткої затримки або очікування повернення в нейтральне положення дозволяє уникнути такої ситуації.

У розробленій логіці також передбачено повернення системи до режиму очікування після виконання команди. Після того як керований об'єкт змінив стан або виконав дію, система знову переходить до зчитування даних інерційного модуля. Така циклічна організація роботи дозволяє забезпечити безперервне керування. Користувач може виконувати жести послідовно, а мікроконтролер

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щоразу проходить однакову послідовність дій: приймання даних, перевірка, визначення жесту, формування команди та повернення до очікування.

Для наочного пояснення логіки перетворення рухів у керуючі команди в підрозділі розміщено блок-схему алгоритму.

Розроблена логіка дозволяє зберегти баланс між простотою реалізації та достатньою функціональністю. З одного боку, система не потребує складного навчання моделі або великого набору даних для розпізнавання рухів. З іншого боку, використання порогів, часових вікон, нейтрального стану та захисту від повторного спрацьовування дозволяє отримати стабільну реакцію на базові жести. Для бакалаврської кваліфікаційної роботи такий підхід є практичним, оскільки він дає змогу продемонструвати повний цикл жестового керування без надмірного ускладнення програмної частини.

На рисунку 2.5 зображено послідовність роботи алгоритму перетворення рухів користувача у керуючі команди. У схемі показано, що система спочатку зчитує дані з інерційного модуля, після чого виконує їх попередню перевірку та фільтрацію. Далі передбачено перевірку нейтрального стану та аналіз відхилень за відповідними осями. Якщо значення не перевищують установлених порогів, система повертається до очікування нового руху. Якщо ж умови певного жесту виконано, мікроконтролер визначає тип жесту, формує відповідну команду та передає її до керованого об'єкта. Після виконання команди система переходить у короткий режим захисту від повторного спрацьовування, а потім знову готова до приймання нових даних.

Окремо варто зазначити, що запропонована логіка може бути розширена в майбутньому. До неї можна додати нові жести, складніші комбінації рухів, адаптивні порогові значення або елементи машинного навчання. Проте на етапі створення базового програмно-технічного засобу пріоритет надано зрозумілості, передбачуваності та простоті налагодження. Це дозволяє чітко простежити, як саме рух користувача перетворюється на команду, і пояснити роботу системи під час практичної демонстрації.



Рисунок 2.5 – Блок-схема перетворення рухів користувача у керуючі команди

2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи сформовано проектну основу програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів. Основну увагу приділено побудові загальної концепції роботи системи, визначенню складу апаратних компонентів, опису взаємодії між сенсорним модулем, мікроконтролером і керованим об'єктом, а також розробленню логіки перетворення рухів користувача у керуючі команди.

У межах розділу сформовано загальну концепцію жестового керування, відповідно до якої рух користувача спочатку фіксується інерційним модулем, після чого отримані вимірювання передаються до мікроконтролера, проходять обробку та перетворюються на команду для виконавчої частини кіберфізичної системи. Такий підхід дозволяє розглядати жестове керування не як окрему допоміжну функцію, а як повний ланцюг взаємодії між людиною, сенсором, програмною логікою та фізичним об'єктом.

Визначено склад апаратних компонентів програмно-технічного засобу. До нього включено мікроконтролер ESP32, інерційний модуль MPU-6050 або його аналог, виконавчий елемент, світлодіодну індикацію, джерело живлення та допоміжні елементи для складання прототипу. Обраний склад компонентів є достатнім для реалізації базового жестового керування, оскільки забезпечує зчитування рухів, обробку даних, формування команди та фізичну реакцію керованого об'єкта. При цьому структура системи залишається компактною та придатною для подальшого розширення.

Побудовано модель взаємодії інерційного сенсора, мікроконтролера та керованого об'єкта. У цій моделі інерційний сенсор виконує роль джерела первинних вимірювань, мікроконтролер відповідає за обробку даних і прийняття рішення, а керований об'єкт реалізує фізичну дію відповідно до сформованої команди. Такий поділ дозволяє чітко визначити функціональне призначення кожного блока та спростити подальшу практичну реалізацію системи.

Окремо організовано потік даних від інерційного модуля до блока прийняття керуючого рішення. Показано, що первинні значення акселерометра та гіроскопа не використовуються як готові команди, а проходять послідовні етапи перевірки, фільтрації, нормалізації та формування часового вікна руху. Така організація дозволяє підготувати вимірювання до стабільного аналізу та зменшити вплив випадкових коливань, шумів і незначних відхилень.

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ ЖЕСТОВОГО КЕРУВАННЯ

3.1 Складання апаратної частини засобу жестового керування

Практичну реалізацію програмно-технічного засобу жестового керування розпочато зі складання апаратної частини, оскільки саме вона забезпечує фізичне зчитування рухів користувача, передавання вимірювань до мікроконтролера та виконання керуючих дій кіберфізичною системою. У межах бакалаврської кваліфікаційної роботи апаратну частину сформовано як компактний прототип, у якому об'єднано інерційний модуль, мікроконтролер, виконавчий елемент, засоби індикації та елементи живлення. Такий склад дозволяє наочно показати повний шлях проходження команди: від руху руки користувача до фізичної реакції керованого об'єкта.

Основою апаратної реалізації обрано мікроконтролер ESP32, який виконує роль центрального керуючого блока. До нього підключено інерційний модуль, що зчитує параметри руху, а також виконавчі та індикаційні елементи, які демонструють результат розпізнавання жесту. ESP32 використано як основний обчислювальний елемент через його достатню продуктивність, наявність цифрових інтерфейсів, компактність і можливість подальшого розширення системи. У межах зібраного прототипу мікроконтролер приймає дані від сенсора, виконує програмну обробку та формує керуючий сигнал для виконавчої частини.

Інерційний модуль підключено до мікроконтролера через цифровий інтерфейс I2C. Такий спосіб підключення є зручним для прототипу, оскільки для обміну даними використано лише дві основні сигнальні лінії: SDA та SCL. Через ці лінії мікроконтролер отримує значення прискорень і кутових швидкостей, які далі використовуються для визначення положення та руху керуючого модуля. Окремо забезпечено підключення ліній живлення та спільної землі, що є обов'язковою умовою стабільного обміну даними між сенсором і мікроконтролером.

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У складі апаратної частини інерційний модуль виконує роль первинного вимірювального блока. Його розміщено так, щоб під час руху користувача він змінював положення разом із керуючим модулем. Це дозволяє фіксувати нахили, повороти та короткі переміщення, які надалі інтерпретуються як жести. Під час складання враховано, що випадкове зміщення сенсора або нестійке кріплення може призводити до неточних вимірювань, тому сенсорний модуль зафіксовано у стабільному положенні. Для демонстраційного прототипу достатнім є розміщення модуля на макетній платі або в невеликому корпусі, який зручно утримувати в руці.

Виконавчу частину засобу жестового керування реалізовано за допомогою простого керованого елемента, наприклад сервопривода або світлодіодної індикації. Такий варіант дозволяє чітко показати, що розпізнаний жест не залишається лише цифровою подією в програмі, а призводить до фізичної реакції кіберфізичної системи. У випадку використання сервопривода команда може змінювати його кут повороту, а у випадку світлодіодів - вмикати різні стани індикації. Це дає змогу перевірити логіку роботи системи без підключення складного механічного об'єкта.

Для забезпечення зворотного зв'язку в апаратну частину включено індикаційні елементи. Світлодіоди можуть відображати факт увімкнення системи, успішне підключення сенсора, розпізнавання жесту або виконання команди. Такий зворотний зв'язок є важливим під час налагодження, оскільки дозволяє швидко зрозуміти, на якому етапі перебуває система. Якщо сенсор передає дані, але виконавчий елемент не реагує, індикація допомагає відокремити помилку апаратного підключення від помилки програмної логіки.

Живлення апаратної частини організовано з урахуванням вимог кожного компонента. Мікроконтролер ESP32 може живитися через USB-порт під час програмування та тестування. Інерційний модуль підключено до відповідної лінії живлення мікроконтролера, а виконавчий елемент, залежно від його типу, може потребувати окремого стабільного живлення. Особливо це важливо для

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сервопривода, оскільки під час руху він може споживати більший струм, ніж сенсор або світлодіоди. Через це в апаратній частині передбачено спільну землю між усіма модулями, щоб керуючі сигнали мікроконтролера коректно сприймалися виконавчою частиною.

Складання прототипу виконано поетапно. Спочатку підключено мікроконтролер і перевірено його працездатність через USB-з'єднання з комп'ютером. Після цього підключено інерційний модуль і перевірено наявність обміну даними через I2C. На наступному етапі додано індикаційні елементи, які дозволили візуально контролювати стан системи. Далі підключено виконавчий елемент, який використовується для демонстрації реакції кіберфізичної системи на розпізнаний жест. Така послідовність складання дозволила поступово перевірити кожен елемент окремо та зменшити ймовірність помилок під час збирання всієї системи.

У процесі складання апаратної частини особливу увагу приділено правильності з'єднань між модулями. Для інерційного модуля важливо не переплутати лінії SDA та SCL, оскільки це призводить до відсутності обміну даними з мікроконтролером. Для виконавчого елемента важливо правильно підключити сигнальний провід і живлення. Для світлодіодної індикації використано обмежувальні резистори, які запобігають перевищенню струму через світлодіоди. Такі прості технічні рішення підвищують надійність прототипу та роблять його придатним для подальшого програмного налагодження.

У зібраному апаратному рішенні мікроконтролер виконує роль центрального вузла, до якого сходяться всі основні з'єднання. Від інерційного сенсора до нього надходить інформація про рух, а від мікроконтролера до виконавчої частини передаються керуючі сигнали. Така структура є простою, але достатньою для реалізації жестового керування. Вона не потребує складної шини даних, додаткового комп'ютера або окремого контролера для кожного модуля.

Це відповідає загальній ідеї роботи, у якій програмно-технічний засіб має бути компактним, зрозумілим і придатним для практичної демонстрації.

Структуру апаратного складання засобу жестового керування показано на рисунку 3.1. У схемі відображено основні компоненти прототипу та напрям передавання сигналів між ними.

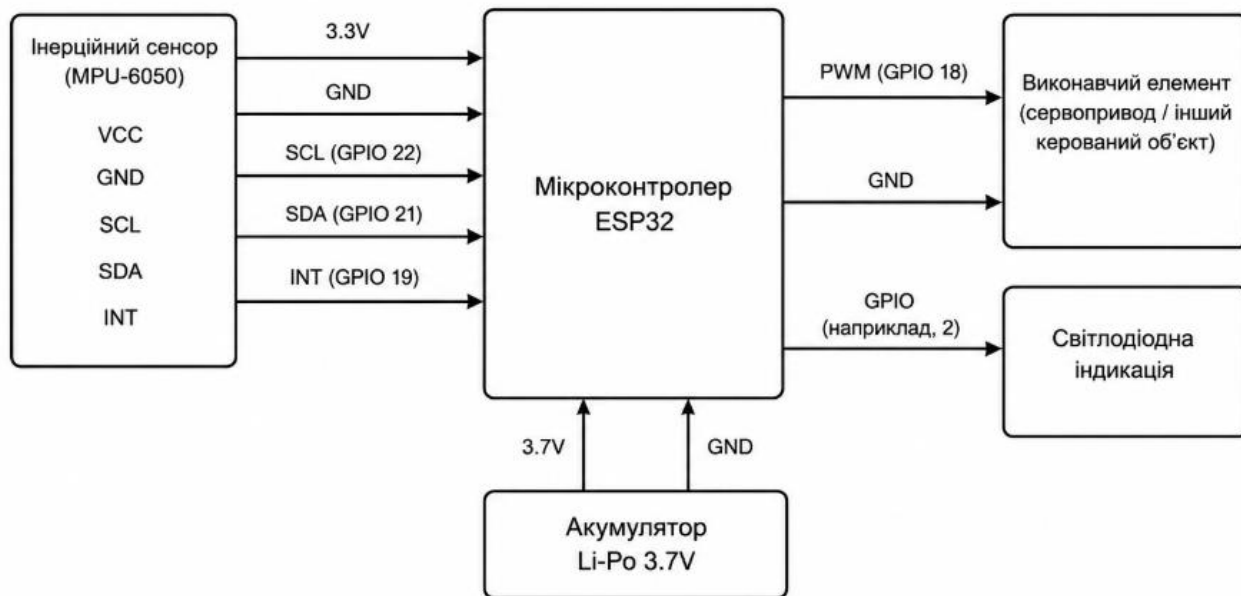


Рисунок 3.1 – Структура апаратного складання засобу жестового керування

Подана схема демонструє, що інерційний модуль передає дані до мікроконтролера ESP32 через інтерфейс I2C, після чого мікроконтролер формує сигнали для виконавчого елемента та блока індикації. Окремо показано джерело живлення, яке забезпечує роботу всіх компонентів прототипу. Такий рисунок відображає фактичний склад апаратної частини та пояснює, як окремі модулі об'єднано в єдину систему жестового керування.

Після складання апаратної частини виконано початкову перевірку працездатності прототипу. На цьому етапі перевірено подавання живлення, стабільність роботи мікроконтролера, наявність зв'язку з інерційним модулем і реакцію індикаційних елементів. Така перевірка є необхідною перед переходом до програмної реалізації, оскільки помилки в апаратному підключенні можуть

створювати хибне враження про неправильну роботу алгоритму. Після підтвердження працездатності основних з'єднань система підготовлена до налаштування зчитування даних із сенсора.

Зібрана апаратна частина має модульну структуру, що спрощує її подальше вдосконалення. За потреби до неї можна додати інші виконавчі елементи, бездротовий канал передавання даних, дисплей або додаткові сенсори. Проте в межах базового прототипу обрано мінімально необхідний склад компонентів, який дозволяє реалізувати основну функцію - перетворення жестів користувача на керуючі дії кіберфізичної системи. Такий підхід дозволяє уникнути надмірного ускладнення апаратної частини та зосередити увагу на логіці зчитування, обробки та інтерпретації рухів.

3.2 Налаштування зчитування даних з інерційного сенсора

Після складання апаратної частини програмно-технічного засобу жестового керування виконано налаштування зчитування даних з інерційного сенсора. Цей етап є важливим для всієї подальшої роботи системи, оскільки саме від коректності отримання первинних вимірювань залежить точність розпізнавання жестів і стабільність формування керуючих команд. Якщо мікроконтролер отримує нестабільні, некоректні або неповні дані від сенсора, подальша програмна логіка не може правильно визначити рух користувача. Через це налаштування зчитування виконано як окремий етап практичної реалізації, що поєднує перевірку підключення, ініціалізацію інерційного модуля, отримання вимірювань і попередній контроль їх коректності.

У межах реалізованого прототипу інерційний сенсор підключено до мікроконтролера ESP32 через інтерфейс I2C. Такий спосіб обміну даними дозволяє використовувати мінімальну кількість сигнальних ліній і водночас забезпечує стабільну передачу значень акселерометра та гіроскопа. Для обміну між ESP32 та інерційним модулем використано лінії SDA і SCL, а також лінії

живлення та спільної землі. Правильне підключення цих ліній перевірено перед запуском програмної частини, оскільки помилка в підключенні хоча б однієї сигнальної лінії призводить до того, що мікроконтролер не виявляє сенсор або отримує неправильні значення.

На першому програмному етапі налаштовано ініціалізацію інтерфейсу I2C. Для цього в коді активовано відповідну бібліотеку обміну даними та задано початкові параметри взаємодії з інерційним модулем. Після запуску мікроконтролер звертається до адреси сенсора та перевіряє, чи доступний модуль для обміну. Така перевірка потрібна для того, щоб система не переходила до розпізнавання жестів без підтверженого зв'язку з вимірювальним блоком. Якщо сенсор не відповідає, у програмній логіці передбачено повідомлення про помилку або зупинку подальшої обробки до усунення проблеми з підключенням.

Після встановлення зв'язку з інерційним модулем виконано налаштування режиму зчитування вимірювань. Сенсор формує дані за кількома осями, тому мікроконтролер отримує значення прискорення за осями X, Y, Z та значення кутової швидкості за тими самими осями. У сукупності ці шість параметрів дозволяють описати поточний стан керуючого модуля у просторі. Дані акселерометра використовуються для оцінки нахилу та лінійних змін положення, а дані гіроскопа - для фіксації обертальних рухів і швидких змін орієнтації. Саме поєднання цих параметрів створює основу для подальшого визначення жестів.

У процесі налаштування враховано, що первинні значення, отримані від інерційного модуля, подаються у вигляді числових значень, які потребують подальшого перетворення. Сирі дані сенсора не завжди зручні для безпосереднього використання, оскільки вони можуть мати різний масштаб і містити зміщення відносно нульового рівня. Через це на етапі зчитування передбачено отримання не лише самих значень, а й їх подальше приведення до зручного формату. Для акселерометра це може бути переведення значень у відносні одиниці прискорення, а для гіроскопа - у значення кутової швидкості.

Такий підхід спрощує подальшу обробку та дозволяє використовувати зрозумілі порогові умови для визначення жестів.

Окремо виконано первинну перевірку стабільності показників сенсора у нерухомому стані. Для цього керуючий модуль залишено у спокійному положенні, після чого через послідовний монітор переглянуто значення прискорень і кутових швидкостей. У нормальному режимі ці значення не повинні різко змінюватися без фактичного руху модуля. Невеликі коливання є природними для інерційних сенсорів, однак надто великі стрибки можуть свідчити про нестабільне живлення, неправильне підключення або потребу в додатковому згладжуванні сигналу. Така перевірка дала змогу переконатися, що сенсор коректно передає дані до мікроконтролера.

Для підвищення точності зчитування виконано базове калібрування початкових значень. У межах цього етапу визначено середні показники сенсора у нерухомому стані, які надалі можуть використовуватися як орієнтир для відокремлення реального руху від початкового зміщення. Особливо це важливо для гіроскопа, оскільки його показники можуть мати невеликий дрейф навіть тоді, коли модуль не рухається. Урахування такого зміщення дозволяє зменшити кількість помилкових реакцій системи та підвищити стабільність розпізнавання жестів.

Налаштування зчитування даних також передбачає вибір періодичності опитування сенсора. Якщо дані зчитуються занадто рідко, система може пропускати короткі жести або різкі рухи руки. Якщо ж опитування відбувається надто часто, мікроконтролер отримує надлишковий потік значень, що може ускладнити обробку та збільшити навантаження на програмну частину. У межах прототипу обрано такий інтервал зчитування, який дозволяє достатньо швидко реагувати на рухи користувача й водночас не перевантажувати мікроконтролер зайвими обчисленнями. Це забезпечує прийнятний баланс між швидкістю та стабільністю роботи.

Після отримання вимірювань дані передаються до програмного блоку попередньої обробки. На цьому етапі вони ще не використовуються як готові команди, а лише формують вхідний потік для подальшого аналізу. Такий поділ є важливим, оскільки зчитування сенсора, фільтрація, визначення жесту та керування виконавчим елементом мають виконуватися послідовно. Завдяки цьому програмна частина залишається зрозумілою, а у разі помилки можна окремо перевірити, на якому саме етапі виникла проблема: під час отримання даних, їх обробки чи формування команди.

Структуру процесу зчитування даних з інерційного сенсора показано на рисунку 3.2. У схемі відображено послідовність дій від запуску мікроконтролера до передавання підготовлених вимірювань у блок подальшої обробки.

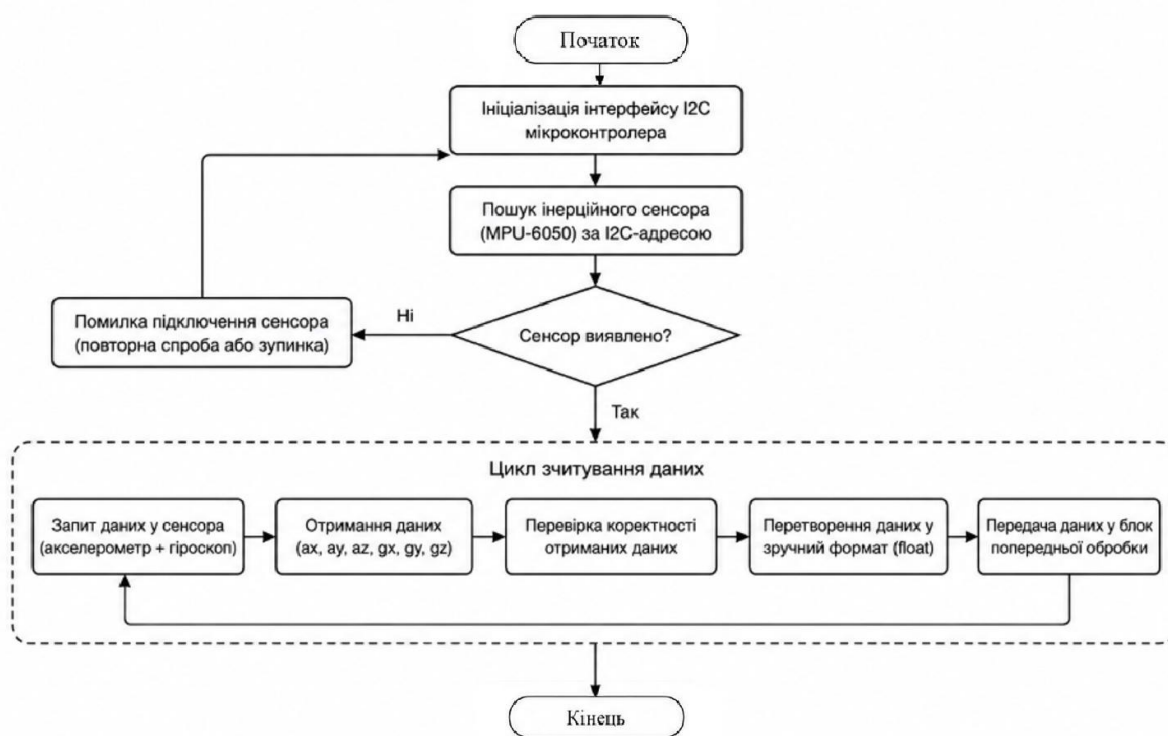


Рисунок 3.2 – Структура зчитування даних з інерційного сенсора

На рисунку 3.2 зображено структуру зчитування даних з інерційного сенсора у складі засобу жестового керування. У схемі показано, що після запуску мікроконтролера виконується ініціалізація інтерфейсу I2C, перевіряється

наявність зв'язку з інерційним модулем, після чого система переходить до циклічного отримання значень акселерометра та гіроскопа. Далі отримані вимірювання проходять первинну перевірку, перетворюються у зручний формат і передаються до блока попередньої обробки. Така схема демонструє, що зчитування даних організовано не як одноразову дію, а як безперервний процес, який забезпечує постійне оновлення інформації про рух керуючого модуля.

У програмній реалізації передбачено виведення отриманих значень у послідовний монітор. Це дало змогу контролювати, як змінюються показники сенсора під час нахилів і рухів керуючого модуля. Під час перевірки можна було простежити, які осі найбільше реагують на конкретний рух, і на основі цього сформувані початкові пороги для подальшого розпізнавання жестів. Наприклад, нахил модуля вліво або вправо проявляється через зміну значень за однією з осей акселерометра, а різкий поворот або струшування краще видно за показниками гіроскопа. Це дозволило пов'язати фізичні рухи з конкретними числовими змінами.

Також у процесі налаштування враховано, що показники сенсора можуть змінюватися залежно від початкового положення модуля в руці. Через це перед основним розпізнаванням жестів доцільно фіксувати умовно нейтральний стан, від якого далі визначаються відхилення. Такий підхід дозволяє зробити систему менш чутливою до того, що користувач може тримати модуль не ідеально рівно. У практичній роботі це має важливе значення, оскільки жестове керування повинно залишатися зручним навіть тоді, коли рухи виконуються не абсолютно однаково.

Після налаштування зчитування даних сформовано основу для подальшої програмної обробки. Система вже отримує послідовність вимірювань, які відображають рух керуючого модуля, і може передавати їх на етап фільтрації, нормалізації та визначення жестів. Саме цей результат є ключовим для переходу до наступних етапів реалізації, оскільки без стабільного потоку даних неможливо забезпечити коректну роботу алгоритму жестового керування.

3.3 Реалізація попередньої обробки та стабілізації вимірювань

Після налаштування зчитування даних з інерційного сенсора реалізовано попередню обробку та стабілізацію вимірювань. Цей етап є необхідним, оскільки значення, які надходять від акселерометра та гіроскопа, не можна одразу використовувати для визначення жестів користувача. Первинні вимірювання відображають реальний рух керуючого модуля, але водночас містять шум, короткочасні коливання, випадкові стрибки та невеликі зміщення, що виникають через особливості роботи сенсора. Якщо такі дані без підготовки передати до блока розпізнавання, система може реагувати на незначне тремтіння руки, нестабільність живлення або залишкові коливання після руху. Через це в програмній частині передбачено окремий етап стабілізації, який дозволяє зробити потік вимірювань більш придатним для подальшого аналізу.

Попередня обробка в межах засобу жестового керування виконує роль проміжного програмного шару між зчитуванням даних і прийняттям керуючого рішення. На цьому етапі сирі значення акселерометра та гіроскопа поступово перетворюються на більш впорядковані параметри, за якими вже можна визначати напрям, інтенсивність і характер руху. У практичній реалізації це означає, що система не реагує на кожне окреме значення сенсора, а спочатку перевіряє його коректність, згладжує різкі випадкові відхилення, враховує початкове зміщення та лише після цього передає результат до логіки розпізнавання жестів.

Першим етапом попередньої обробки реалізовано перевірку коректності отриманих вимірювань. Після кожного звернення до інерційного модуля мікроконтролер отримує набір значень за осями X, Y, Z для акселерометра та гіроскопа. У нормальному режимі ці значення змінюються поступово або відповідно до фактичного руху модуля. Якщо ж у потоці з'являється різке некоректне значення, яке не відповідає характеру руху, воно може бути наслідком збою зчитування або перешкоди в обміні даними. Для уникнення

помилкової реакції такі значення не повинні одразу впливати на формування команди. Через це в програмній логіці передбачено первинний контроль даних перед їх передаванням на наступний етап.

Наступним етапом реалізовано згладжування вимірювань. Для цього використано просту фільтрацію, яка зменшує вплив дрібних випадкових коливань. У межах прототипу достатнім є застосування усереднення кількох останніх значень або простого фільтра низьких частот, який дозволяє залишити основну тенденцію зміни сигналу та приглушити височастотний шум. Такий підхід добре підходить для мікроконтролерної реалізації, оскільки не потребує складних обчислень і водночас помітно підвищує стабільність показників. Завдяки згладжуванню система менше реагує на тремтіння руки та випадкові короткі імпульси, які не є повноцінними жестами.

Особливу увагу приділено фіксації нейтрального положення керуючого модуля. Під час запуску системи або перед початком основної роботи сенсор може мати певні початкові значення, навіть якщо модуль перебуває у спокійному стані. Це пов'язано з впливом сили тяжіння на акселерометр, невеликим зміщенням гіроскопа та тим, що користувач може тримати модуль не ідеально рівно. Тому для стабілізації вимірювань реалізовано визначення базового стану, відносно якого надалі оцінюються відхилення. Такий підхід дозволяє не вимагати абсолютно точного початкового положення пристрою та робить керування зручнішим у реальних умовах.

Після визначення базового стану реалізовано компенсацію початкового зміщення. Суть цього етапу полягає в тому, що з поточних значень сенсора віднімаються або враховуються початкові значення, отримані в нейтральному положенні. У результаті система аналізує не абсолютні показники, а відхилення від умовного спокійного стану. Це особливо важливо для гіроскопа, оскільки навіть у нерухомому положенні він може показувати невеликі ненульові значення. Якщо не врахувати таке зміщення, програмна логіка може помилково

визначати наявність руху там, де його фактично немає. Компенсація дозволяє зробити реакцію системи більш передбачуваною.

Для підвищення стабільності роботи також реалізовано використання порогів нечутливості. У межах цього підходу невеликі відхилення значень не сприймаються як активний рух. Наприклад, якщо зміна прискорення або кутової швидкості не перевищує встановлену межу, вона вважається фоновим коливанням і не передається до блока розпізнавання як ознака жесту. Такий механізм виконує роль програмної «мертвої зони», яка запобігає випадковому формуванню команд. Для жестового керування це має суттєве значення, оскільки рука користувача майже ніколи не залишається абсолютно нерухомою, навіть якщо активний жест не виконується.

Окремим завданням попередньої обробки стало приведення даних до узгодженого формату. Значення акселерометра та гіроскопа мають різну фізичну природу, різний масштаб і різну чутливість до руху. Через це в програмній частині передбачено їх подання у вигляді параметрів, зручних для подальшого порівняння з порогоми. Для акселерометра основне значення мають відхилення, пов'язані з нахилом і напрямом руху, а для гіроскопа - швидкі обертальні зміни. Після такого впорядкування програмна логіка може простіше визначати, який саме тип руху виконано: плавний нахил, поворот, різке зміщення або короткий імпульсний жест.

Стабілізація вимірювань також пов'язана з часовою перевіркою сигналу. Окреме перевищення порогу ще не означає, що користувач справді виконав жест. Воно може виникнути через короткий поштовх або випадковий стрибок показника. Тому в системі передбачено аналіз кількох послідовних вимірювань. Якщо відхилення зберігається протягом короткого проміжку часу або повторюється в кількох циклах зчитування, воно сприймається як більш надійна ознака жесту. Завдяки цьому система не реагує на одиничні випадкові імпульси, а формує підготовлені дані лише тоді, коли рух має достатню часову стійкість.

Процес попередньої обробки та стабілізації вимірювань показано на рисунку 3.3. У схемі відображено, як первинні значення інерційного сенсора поступово переходять у стабілізовані параметри, придатні для розпізнавання жестів.



Рисунок 3.3 – Послідовність попередньої обробки та стабілізації вимірювань інерційного сенсора

На рисунку 3.3 зображено послідовність попередньої обробки та стабілізації вимірювань інерційного сенсора. У схемі показано, що після зчитування первинних даних виконується перевірка коректності значень, згладжування шумів, визначення нейтрального стану, компенсація початкового зміщення та застосування порогів нечутливості. Після цього дані приводяться до робочого формату й передаються до блока розпізнавання жестів. Така послідовність демонструє, що система не використовує сирі показники безпосередньо, а попередньо готує їх для стабільного прийняття керуючого рішення.

Практична реалізація попередньої обробки дозволила отримати більш рівномірний потік значень у порівнянні з первинними вимірюваннями. Під час нерухомого положення керуючого модуля показники після фільтрації

залишаються в межах невеликих допустимих коливань, що не призводить до випадкового визначення жесту. Під час активного нахилу або руху система фіксує вже більш виразне відхилення, яке проходить перевірку за встановленими умовами. Це дозволяє краще розділити фоновий стан і реальну дію користувача.

Під час налаштування стабілізації враховано, що надмірне згладжування може створювати затримку реакції системи. Якщо фільтр занадто сильно приглушує зміни, жест може розпізнаватися із запізненням або втрачати чіткість. Через це параметри фільтрації підібрано так, щоб зменшити шум, але не зробити систему занадто повільною. Такий баланс є важливим, оскільки жестове керування має залишатися швидким і відчутним для користувача. У межах прототипу пріоритет надано простій і передбачуваній обробці, яка добре працює на мікроконтролері та не потребує значних обчислювальних ресурсів.

Реалізована попередня обробка також спрощує подальше розпізнавання жестів. Якщо до блока визначення жесту надходять уже стабілізовані та впорядковані дані, логіка порівняння з порогоми працює надійніше. Це дозволяє уникнути надмірного ускладнення алгоритму розпізнавання, оскільки частина проблем, пов'язаних із шумом і зміщенням, вирішується ще до етапу прийняття рішення. У результаті програмна структура стає більш послідовною: спочатку система отримує вимірювання, потім стабілізує їх, після цього визначає жест і лише в кінці формує команду.

3.4 Реалізація програмної логіки визначення жестів користувача

Після реалізації попередньої обробки та стабілізації вимірювань виконано програмну логіку визначення жестів користувача. Цей етап став основною частиною програмної реалізації засобу жестового керування, оскільки саме на ньому підготовлені дані інерційного сенсора перетворюються на зрозумілі команди для кіберфізичної системи. Якщо на попередньому етапі значення акселерометра та гіроскопа лише очищуються від шумів, згладжуються та

приводяться до зручного формату, то в межах цього підрозділу вже описано логіку прийняття рішення щодо того, який саме жест виконав користувач.

Програмна логіка визначення жестів побудована за принципом послідовної перевірки стабілізованих вимірювань. Система циклічно отримує підготовлені значення за осями інерційного модуля, порівнює їх із заданими порогами та визначає напрям або характер руху. Такий підхід дозволяє реалізувати розпізнавання без складних моделей машинного навчання, що є доцільним для мікроконтролерного прототипу. У межах бакалаврської кваліфікаційної роботи пріоритет надано простій, зрозумілій і передбачуваній логіці, яка може стабільно працювати на ESP32 у режимі, близькому до реального часу.

Основою визначення жестів виступає набір умов, пов'язаних із відхиленнями керуючого модуля від нейтрального положення. Нейтральним вважається стан, у якому користувач не виконує активного жесту, а значення прискорень і кутових швидкостей залишаються в межах допустимої зони. У програмі такий стан використовується як початкова точка для подальшого аналізу. Якщо відхилення не перевищує встановлений поріг, система не формує команду та продовжує очікувати новий рух. Це дозволяє уникнути випадкових реакцій на дрібні коливання руки або незначне зміщення керуючого модуля.

Для визначення напрямних жестів використано аналіз осей акселерометра. Нахил керуючого модуля вліво або вправо визначається за зміною значення однієї з горизонтальних осей, а нахил уперед або назад - за зміною значення іншої осі. Якщо показник перевищує додатний поріг, система трактує це як рух в одному напрямку, а якщо значення переходить за від'ємний поріг - як рух у протилежному напрямку. Завдяки цьому одна вісь може використовуватися для розпізнавання двох різних жестів, що спрощує структуру програми та зменшує кількість необхідних умов.

Окремо в програмній логіці враховано швидкі рухи, які краще проявляються у показниках гіроскопа. Якщо користувач виконує різкий поворот

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

або коротке струшування керуючого модуля, значення кутової швидкості змінюється значно швидше, ніж під час плавного нахилу. Такі жести можуть використовуватися для окремих команд, наприклад для підтвердження дії, перемикання режиму або скидання поточного стану системи. Це дозволяє розширити набір команд без додавання нових апаратних елементів, оскільки система використовує вже наявні вимірювання інерційного модуля.

У межах реалізованої логіки визначено базовий набір жестів, достатній для демонстрації працездатності засобу жестового керування. До такого набору можуть входити нахил вліво, нахил вправо, нахил уперед, нахил назад і короткий різкий рух. Кожному жесту поставлено у відповідність окрему команду. Наприклад, нахил вліво може відповідати команді LEFT, нахил вправо - команді RIGHT, нахил уперед - команді START, нахил назад - команді STOP, а різкий рух - команді MODE або RESET. Така структура команд є зрозумілою і зручною для подальшого передавання до виконавчого елемента кіберфізичної системи.

Для підвищення стабільності розпізнавання в програмній логіці передбачено перевірку тривалості жесту. Окреме миттєве перевищення порогу не завжди означає, що користувач справді виконав командний рух. Воно може бути наслідком випадкового поштовху, короткого тремтіння або різкого стрибка сенсорного значення. Тому жест підтверджується лише тоді, коли відповідна умова зберігається протягом кількох циклів зчитування або в межах короткого часового проміжку. Такий підхід дозволяє зменшити кількість хибних спрацьовувань і зробити реакцію системи більш передбачуваною.

Ще одним важливим елементом стала реалізація блокування повторного спрацьовування. Після того як жест визначено і команду сформовано, система на короткий час переходить у стан очікування або вимагає повернення керуючого модуля до нейтрального положення. Це потрібно для того, щоб один нахил або один різкий рух не був розпізнаний кілька разів поспіль. Наприклад, якщо користувач нахилив модуль вправо та затримав його в такому положенні, без блокування мікроконтролер міг би багаторазово формувати одну й ту саму

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

команду RIGHT. Запровадження такого захисту робить керування більш зручним і близьким до роботи звичайної кнопки, де одне натискання відповідає одній дії.

У програмній реалізації логіку визначення жестів умовно поділено на кілька станів. Першим є стан очікування, у якому система зчитує дані та перевіряє, чи перебуває модуль у нейтральній зоні. Другим є стан виявлення руху, коли значення виходять за встановлені межі та система починає аналізувати напрям жесту. Третім є стан підтвердження, у якому перевіряється тривалість і сталість відхилення. Після цього формується команда, а система переходить до стану блокування повторного спрацювання. Після повернення модуля до нейтрального положення цикл повторюється.

Такий підхід дає змогу реалізувати просту програмну модель поведінки системи. Вона не реагує хаотично на будь-яку зміну показників, а проходить чітку послідовність перевірок. Це особливо важливо для жестового керування, оскільки рухи людини можуть бути неточними, нерівномірними та відрізнитися за швидкістю виконання. Програмна логіка має не вимагати абсолютно однакових рухів, а давати змогу стабільно визначати основний намір користувача. Саме тому у програмі використано пороги, нейтральну зону, часове підтвердження та блокування повторного спрацювання.

Алгоритм програмної логіки визначення жестів користувача показано на рисунку 3.4. У схемі відображено послідовність переходу від стабілізованих вимірювань до визначення конкретного жесту та формування команди керування.

Подана схема демонструє, що після отримання стабілізованих даних система перевіряє нейтральний стан, аналізує відхилення за осями, порівнює значення з порогами та визначає напрям або тип руху. Якщо жодна умова не виконана, мікроконтролер повертається до очікування нового циклу вимірювання.

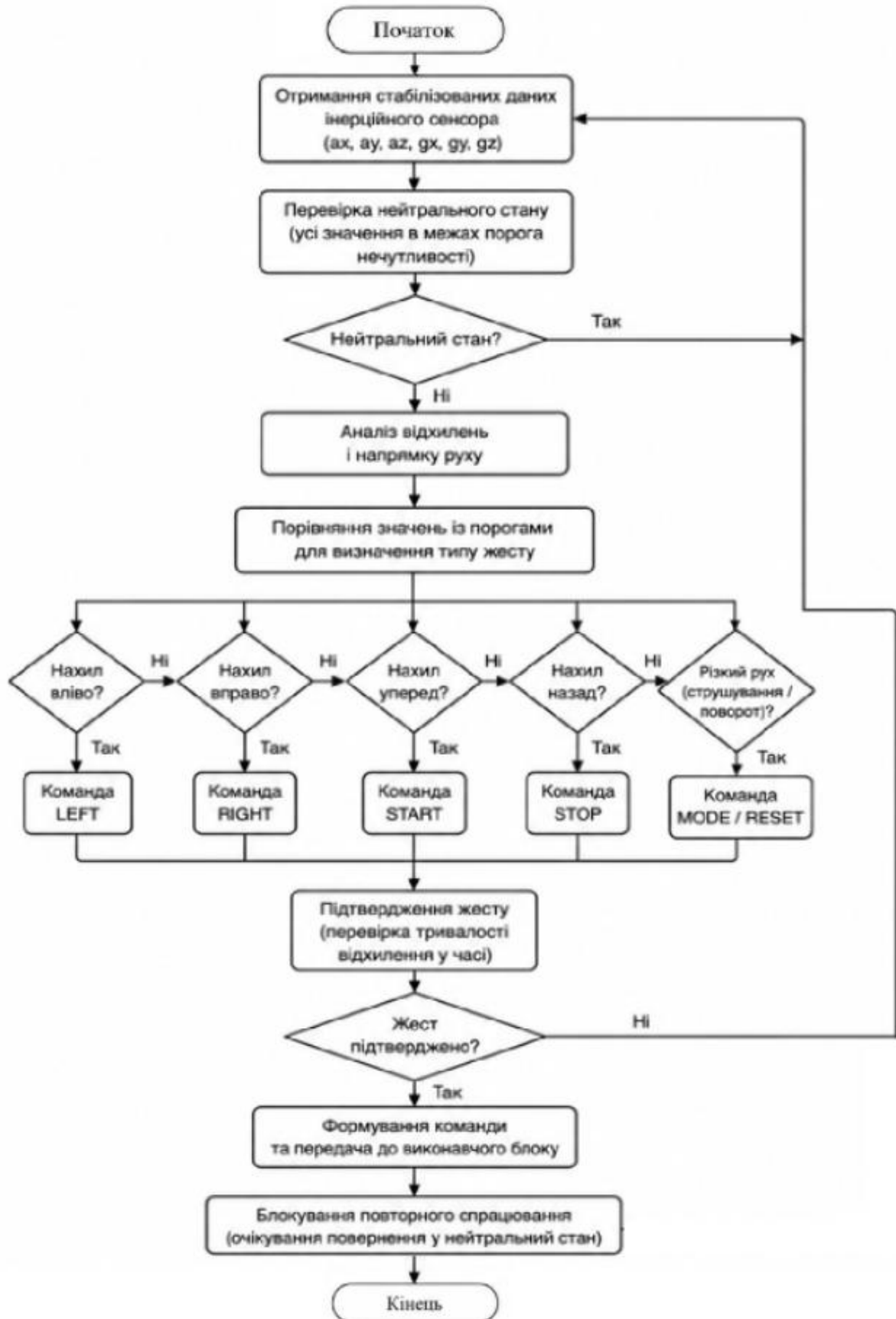


Рисунок 3.4 – Алгоритм програмної логіки визначення жестів користувача

Якщо певний жест підтверджено, програма формує відповідну команду, передає її до наступного блока керування та активує захист від повторного спрацювання. Така структура дозволяє показати, що визначення жесту виконується не за одним випадковим показником, а за послідовністю перевірених умов.

У процесі налаштування логіки визначення жестів особливу увагу приділено вибору порогових значень. Якщо поріг встановити занадто низьким, система починає реагувати на дрібні коливання руки та випадкові зміщення модуля. Якщо поріг занадто високий, користувачу доводиться виконувати надмірно різкі або незручні рухи, що знижує практичну зручність керування. Через це пороги підібрано експериментально на основі спостереження за показниками сенсора під час виконання базових жестів. Такий підхід дозволив знайти компроміс між чутливістю та стійкістю системи.

Під час перевірки логіки визначення жестів через послідовний монітор відстежено, які значення сенсора відповідають конкретним рухам. Це дало змогу побачити, що плавні нахили краще визначаються за показниками акселерометра, а різкі рухи та повороти - за показниками гіроскопа. Унаслідок цього програмну логіку побудовано так, щоб для різних типів жестів використовувалися найбільш інформативні параметри. Такий підхід підвищує точність визначення команд і зменшує кількість ситуацій, коли один жест може бути помилково сприйнятий як інший.

Реалізована логіка також передбачає можливість розширення набору жестів. У разі потреби до програми можна додати нові умови, які відповідатимуть іншим напрямкам руху, комбінаціям нахилів або послідовностям жестів. Проте в межах базового прототипу залишено обмежений набір команд, оскільки він краще підходить для стабільної демонстрації роботи системи. Надмірна кількість жестів на початковому етапі могла б ускладнити розпізнавання та знизити надійність керування.

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи описано практичну реалізацію програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційного сенсора. Основну увагу приділено складанню апаратної частини, налаштуванню зчитування даних, попередній обробці вимірювань та реалізації програмної логіки визначення жестів користувача. Це дозволило перейти від проектної моделі до працездатного прототипу, у якому рухи керуючого модуля перетворюються на команди для виконавчої частини системи.

У межах апаратної реалізації сформовано структуру прототипу, до складу якого включено мікроконтролер ESP32, інерційний сенсор MPU-6050, виконавчий елемент, блок індикації та живлення. Підключення інерційного модуля організовано через інтерфейс I2C, що забезпечило передавання даних акселерометра та гіроскопа до мікроконтролера.

Для підвищення стабільності роботи реалізовано попередню обробку вимірювань. Первинні дані інерційного сенсора проходять перевірку коректності, згладжування, компенсацію початкового зміщення, визначення нейтрального стану та застосування порогів нечутливості. Це дозволяє зменшити вплив шумів, випадкових коливань і незначного тремтіння руки.

У програмній логіці визначення жестів реалізовано послідовну перевірку стабілізованих вимірювань за встановленими порогоми. Передбачено аналіз нахилів керуючого модуля, визначення напрямку руху, перевірку тривалості відхилення та блокування повторного спрацювання. Такий підхід дозволив сформувати базовий набір команд, які відповідають основним жестам користувача. Завдяки цьому система не реагує на випадкові короткі імпульси, а формує команду лише тоді, коли рух має достатню амплітуду, напрям і часову стійкість.

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто проблему створення програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів. У процесі виконання роботи основну увагу зосереджено на тому, як природні рухи користувача можна перетворити на зрозумілі керуючі команди для технічної системи. Актуальність обраної теми пов'язана з тим, що сучасні кіберфізичні системи дедалі частіше потребують зручних, компактних і швидких способів взаємодії з користувачем, а традиційні засоби керування не завжди є достатньо гнучкими в умовах мобільної або динамічної роботи.

У першому розділі проаналізовано особливості кіберфізичних систем та роль людино-машинних інтерфейсів у їх роботі. Показано, що ефективність таких систем залежить не лише від апаратних компонентів і програмної логіки, а й від того, наскільки зручно користувач може передавати команди та отримувати зворотний зв'язок. Розглянуто основні підходи до жестового керування, серед яких виділено оптичні системи, спеціалізовані контролери, сенсорні рукавички та рішення на основі інерційних сенсорів. У результаті аналізу встановлено, що використання акселерометрів і гіроскопів є доцільним для побудови компактного засобу керування, оскільки такі сенсори не залежать від освітлення, не потребують камери та можуть працювати у складі невеликого вбудованого пристрою.

У другому розділі сформовано загальну концепцію програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою. Запропоновано логіку, за якою рух користувача спочатку фіксується інерційним модулем, потім передається до мікроконтролера, обробляється програмними засобами та перетворюється на керуючу команду. Для реалізації системи визначено склад апаратних компонентів, до якого включено мікроконтролер ESP32, інерційний модуль MPU-6050 або його аналог, виконавчий елемент, світлодіодну індикацію,

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

джерело живлення та допоміжні компоненти для складання прототипу. Такий склад забезпечує мінімально необхідну апаратну основу для перевірки принципу жестового керування без надмірного ускладнення конструкції.

У роботі розроблено логіку перетворення рухів користувача у керуючі команди. Для цього використано пороговий підхід, який дозволяє визначати базові жести за відхиленнями керуючого модуля від нейтрального стану. Передбачено розпізнавання нахилів у різні сторони, швидких рухів і простих командних дій. Для підвищення стабільності роботи враховано мертву зону, часову перевірку жесту та захист від повторного спрацьовування. Це дозволяє уникнути ситуацій, коли один рух помилково сприймається як кілька команд або коли система реагує на незначне тремтіння руки.

У третьому розділі описано практичну реалізацію програмно-технічного засобу. Складено апаратну частину прототипу, у якій поєднано ESP32, інерційний сенсор, виконавчий елемент, індикацію та живлення. Налаштовано зчитування даних з інерційного модуля через інтерфейс I2C, перевірено отримання значень акселерометра та гіроскопа, а також організовано передавання цих даних до програмного блока попередньої обробки. Реалізовано стабілізацію вимірювань, що включає перевірку коректності значень, згладжування шумів, компенсацію початкового зміщення та приведення даних до робочого формату.

У підсумку виконана бакалаврська кваліфікаційна робота підтверджує можливість створення компактного програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів. Запропоноване рішення поєднує доступну апаратну основу, зрозумілу програмну логіку та можливість подальшого розширення. Система може використовуватися як демонстраційний прототип для керування простими виконавчими елементами, а також як основа для подальшого розвитку більш складних кіберфізичних рішень, де важливими є мобільність, природність керування та швидке перетворення рухів користувача у керуючі дії.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Demrozi F., Pravadelli G., Bihorac A., Rashidi P. Human Activity Recognition Using Inertial, Physiological and Environmental Sensors: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*. 2020. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33344100/> (дата звернення: 19.02.2026).
2. Gu F., Khoshelham K., Shang J., Yu F., Wei Z. A Survey on Deep Learning for Human Activity Recognition. *ACM Computing Surveys*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3472290> (дата звернення: 19.02.2026).
3. Zhang S., Li Y., Zhang Y., Shahabi C. Deep Learning in Human Activity Recognition with Wearable Sensors: A Review. *Sensors*. 2022. 22(4). 1476. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041476> (дата звернення: 19.02.2026).
4. Jeon H., Lee K., Park J., Lee S. Wearable Inertial Sensor-Based Hand-Guiding Gestures Recognition Robust to Body Alignment Changes. *Mathematics*. 2022. 10(24). 4753. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/24/4753> (дата звернення: 19.02.2026).
5. Vázquez J. P., Serrano A., Zambrano P., et al. Hand Gesture Recognition Using EMG-IMU Signals and Deep Q-Networks. *Sensors*. 2022. 22(24). 9613. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/24/9613> (дата звернення: 19.02.2026).
6. Fu L., Chen J., Li X., et al. IMU Based Human Gestures Recognition Using Deep Learning with Attention Mechanism. *ACM Proceedings*. 2022. DOI: <https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/3584376.3584588> (дата звернення: 19.02.2026).
7. Tchantchane R., et al. A Review of Hand Gesture Recognition Systems Based on Noninvasive Wearable Sensors. *Advanced Intelligent Systems*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/aisy.202300207> (дата звернення: 19.02.2026).
8. Bilius L.-B., Pentiuș Ș.-G., Vatavu R.-D. TIGER: A Tucker-based instrument for gesture recognition with inertial sensors. *Pattern Recognition Letters*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2022.11.028> (дата звернення: 19.02.2026).

					КВРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Jiang W., et al. Wearable on-device deep learning system for hand gesture recognition using IMU sensors. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2021. URL: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/mbe.2021007> (дата звернення: 19.02.2026).

10. Singh G., et al. An Edge AI Solution for Hand Gesture Recognition. *ACM Proceedings*. 2024. DOI: <https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/3675888.3676089> (дата звернення: 19.02.2026).

11. Harnessing Wearable IMU Sensors and TinyML to Enable Real-Time Hand Gesture Recognition. *ACM Proceedings*. 2024. DOI: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3639856.3639903> (дата звернення: 19.02.2026).

12. Grabarczyk J., et al. Microcontroller Unit-Based Gesture Recognition System. *Machines*. 2025. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/13/2/90> (дата звернення: 19.02.2026).

13. Di Leo K., et al. Microcontroller Implementation of LSTM Neural Networks for Hand-Gesture Classification. *Sensors / PMC (повний текст)*. 2025. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12197242/> (дата звернення: 19.02.2026).

14. Xie J., et al. Enhanced Recognition for Finger Gesture-Based Control in Humanoid Robot Control Systems Using Inertial Sensing. 2024. URL: <https://www.icck.org/article/abs/tsc.2024.805710> (дата звернення: 19.02.2026).

15. Ji A., et al. Dataglove for Sign Language Recognition Using Multiple Inertial Sensors. *Sensors*. 2023. 23(15). 6693. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/15/6693> (дата звернення: 19.02.2026).

16. Loizzo F. G. C., Rovini E., Di Nuovo A., Cavallo F. Gesture recognition through inertial and visual data. *I-RIM Conference Paper*. 2020. URL: https://i-rim.it/wp-content/uploads/2020/12/I-RIM_2020_paper_54.pdf (дата звернення: 19.02.2026).

17. Ray P. P. A review on TinyML: State-of-the-art and prospects. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. 2022. URL:

					КВРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157821003335> (дата звернення: 19.02.2026).

18. Su S., et al. Transformer-based adversarial learning for human activity recognition using wearable sensors. *Knowledge-Based Systems*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950705122012394> (дата звернення: 19.02.2026).

19. Gupta S., et al. Deep learning based human activity recognition (CNN-GRU). *Array*. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667096821000392> (дата звернення: 19.02.2026).

20. Zhang Y., Wang L., Chen H. IF-ConvTransformer: A Framework for Human Activity Recognition Using IMU Fusion and ConvTransformer. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1145/3534584> (дата звернення: 19.02.2026).

21. Li S., et al. P2LHAP: Wearable sensor-based human activity recognition, segmentation and forecasting (оглядова праця). *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/pdf/2403.08214> (дата звернення: 19.02.2026).

22. Lamaakal I., et al. A tiny inertial transformer for human activity recognition via wearable sensors. *Scientific Reports*. 2025. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-26297-2> (дата звернення: 19.02.2026).

23. Guo X., et al. Enhancing the Transformer Model with a Convolutional Module for IMU-Based Activity Recognition. *Sensors*. 2025. 25(2). 301. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/2/301> (дата звернення: 19.02.2026).

24. Ru X., et al. MEMS Inertial Sensor Calibration Technology. *Micromachines*. 2022. 13(6). 879. URL: <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/6/879> (дата звернення: 19.02.2026).

25. Harindranath A., et al. User-conducted calibration methods for MEMS-based IMUs: review and analysis. *Measurement*. 2024. URL:

					КВРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224123015658> (дата звернення: 19.02.2026).

26. Shi Y., et al. IMU/UWB Fusion Method Using a Complementary Filter for Robust Orientation/Tracking. *Sensors*. 2023. 23(15). 6700. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/15/6700> (дата звернення: 19.02.2026).

27. Xu T., et al. Thermal calibration for triaxial gyroscope of MEMS-IMU. *Scientific Reports*. 2024. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-74472-8> (дата звернення: 19.02.2026).

28. Novel magnetometer-free IMU-based orientation estimation for upper limb kinematics. *Wearable Technologies (Cambridge)*. 2025. URL: <https://resolve.cambridge.org/core/journals/wearable-technologies/article/novel-magnetometerfree-inertialmeasurementunitbased-orientation-estimation-approach-for-measuring-upper-limb-kinematics/40B8883F0C7625E3F8DB1479DD85CB05> (дата звернення: 19.02.2026).

29. Wearable gesture control design for unmanned aerial vehicle based on multisensor fusion. *Robotica (Cambridge)*. 2025. URL: <https://resolve.cambridge.org/core/journals/robotica/article/wearable-gesture-control-design-for-unmanned-aerial-vehicle-based-on-multisensor-fusion/1506B50D92236F708B856ADFF1521287/core-reader> (дата звернення: 19.02.2026).

30. Deshpande K., et al. Study and Survey on Gesture Recognition Systems. *arXiv*. 2023. URL: <https://arxiv.org/pdf/2312.00392> (дата звернення: 19.02.2026).

31. Digo E., et al. A Dataset of Standard and Abrupt Industrial Gestures (MIMUs). *Robotics*. 2025. URL: <https://www.mdpi.com/2218-6581/14/12/176> (дата звернення: 19.02.2026).

32. Kyranou I., et al. EMG Dataset for Gesture Recognition with Arm Translation. *Scientific Data*. 2025. URL: <https://www.nature.com/articles/s41597-024-04296-8> (дата звернення: 19.02.2026).

					КВРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

33. Rodriguez Serrezuela R., et al. Hybrid Convolutional Vision Transformer for Robust Low-Cost Gesture Recognition (з контекстом ІМУ/носимих сенсорів). *Inventions*. 2025. URL: <https://www.mdpi.com/2313-7673/10/12/806> (дата звернення: 19.02.2026).

34. Bashir S., et al. Intelligent recognition of human activities using deep learning methods (огляд з посиланнями на ІМУ). *PMC (оглядова стаття)*. 2025. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12021237/> (дата звернення: 19.02.2026).

35. Gong X., et al. Lightweight human activity recognition method based on wearable sensors. *Taylor & Francis Online*. 2024. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21642583.2024.2328549> (дата звернення: 19.02.2026).

36. Zhang H., et al. A comprehensive review of sEMG-IMU sensor fusion for upper limb movement pattern recognition. *Information Fusion*. 2026. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253525004956> (дата звернення: 19.02.2026).

37. Dai X., et al. Application of CNN-LSTM feature fusion architecture for gesture recognition. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2026. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1746809425010845> (дата звернення: 19.02.2026).

38. Li B., et al. CNN-LSTM and post-processing for EMG-based hand gesture recognition (дотичне до мультисенсорних НМІ). *HardwareX / Elsevier*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667305324000280> (дата звернення: 19.02.2026).

39. Meta Platforms. Hand Tracking Overview (Unity). 2024. URL: <https://developers.meta.com/horizon/documentation/unity/unity-handtracking-overview/> (дата звернення: 19.02.2026).

					КВРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

40. Apple Support. About Apple Vision Pro input and hand tracking (обмеження та особливості). 2024. URL: <https://support.apple.com/en-us/117741> (дата звернення: 19.02.2026).

41. Alabdullah M. M. An Autonomous Calibration for IMUs Using Sensor Data (дисертаційний/репозиторійний матеріал). 2024. URL: <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/219647/7/m39062-alabdullah%20final.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).

42. Haresamudram H., Essa I., Plötz T. Assessing the state of self-supervised human activity recognition using wearables. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2022. URL: <https://arxiv.org/html/2508.12213v1> (дата звернення: 19.02.2026).

43. Haresamudram H., et al. Past, present, and future of sensor-based human activity recognition using wearables: surveying tutorial. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2025. URL: <https://arxiv.org/html/2508.12213v1> (дата звернення: 19.02.2026).

44. Awesome-IMU-Sensing: A collection of datasets, papers, and resources for IMU sensing (каталог джерел і датасетів). 2025. URL: <https://github.com/rh20624/Awesome-IMU-Sensing> (дата звернення: 19.02.2026).

45. Юхимчук М., Нестюк Л. (та ін.). Стаття про шлях даних у людино-машинному інтерфейсі та програмні компоненти (фахове видання). *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024-2025. URL: <https://vottp.khmnu.edu.ua/index.php/vottp/article/download/410/388/867> (дата звернення: 19.02.2026).

46. Yeroshenko O. Порівняльний аналіз методів реального часу для розпізнавання жестів (інтеграція в інформаційні системи). *Системи управління, навігації та зв'язку (НУПП)*. 2025. URL: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/4104> (дата звернення: 19.02.2026).

47. Євсєєв В. В. Методи та моделі кіберфізичного керування процесами (кваліфікаційна/наукова праця, репозиторій). 2021. URL:

					КВРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://openarchive.nure.ua/bitstreams/8021ae6e-aea5-4797-a311-fb871f8a2926/download> (дата звернення: 19.02.2026).

48. Шовковий Є. І. Кваліфікаційна робота: застосування ІМУ у VR/жестовому управлінні (репозиторій ХНУРЕ). 2025. URL: <https://openarchive.nure.ua/bitstreams/1c2c4957-0865-4919-a40b-59c31bb0bcd1/download> (дата звернення: 19.02.2026).

49. Gontarenko I. O. Кваліфікаційна робота: удосконалення методу слідування траєкторії за даними акселерометра та гіроскопа (MPU6050). 2024-2025. URL: <https://openarchive.nure.ua/bitstreams/cbc112bd-26d7-4fd4-8c24-5843f1d87d0f/download> (дата звернення: 19.02.2026).

50. Cui C. Deep vision-time hand gesture recognition (дотичне до часових моделей розпізнавання). *PeerJ Computer Science*. 2025. URL: <https://peerj.com/articles/cs-2921/> (дата звернення: 19.02.2026).

51. Corlu C. G., et al. Sensor fusion algorithms for IMUs: complementary vs Kalman and fault tolerance aspects. *Winter Simulation Conference Papers*. 2023. URL: <https://informs-sim.org/wsc23papers/237.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).

52. Chotikunnan P., et al. Comparative Analysis of Sensor Fusion for Angle Estimation (Kalman vs complementary). 2025. URL: <https://pubs2.ascee.org/index.php/IJRCS/article/view/1674> (дата звернення: 19.02.2026).

53. López L. I. B., et al. Real-time hand gesture recognition model using deep learning techniques (модельні підходи для HGR). 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667305324000280> (дата звернення: 19.02.2026).

54. Lopez et al. (приклад застосування пост-обробки предикцій у HGR). 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667305324000280> (дата звернення: 19.02.2026).

					КВРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

55. Li S., et al. Sensor-based activity recognition tasks and segmentation (узагальнення підходів до часових вікон та сегментації). 2024. URL: <https://arxiv.org/pdf/2403.08214> (дата звернення: 19.02.2026).

56. StrengthSense: A Dataset of IMU Signals Capturing Strength Movements (датасет, IMU + відео-розмітка). *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/html/2511.02027v1> (дата звернення: 19.02.2026).

57. Microsoft KinectMicrosoft Kinect. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Kinect>

58. Leap Motion / Ultraleap. URL: <https://unboundxr.com/ultraleap-leap-motion-controller-2-xr-enterprise-edition>

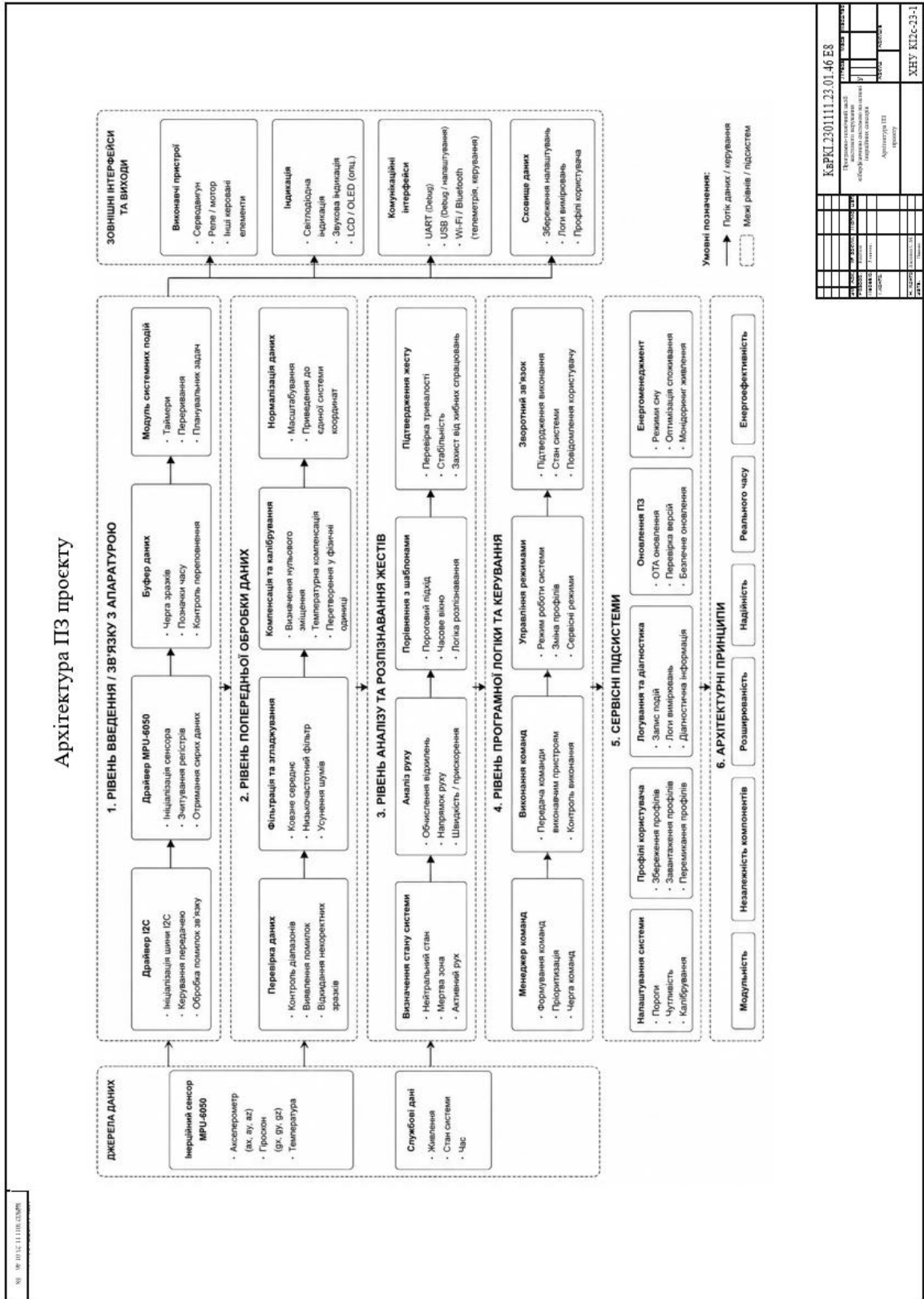
59. Myo armband (Thalmic Labs). URL: https://www.researchgate.net/figure/Myo-armband-by-Thalmic-Labs_fig9_316538856

60. Meta Quest. URL: <https://www.amazon.com/Oculus-Quest-All-One-Electronic-Games/dp/B0973RP7H3>

					КвРКІ. 2301111.23.01.46 ПЗ	Арк. 74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А (обов'язковий)

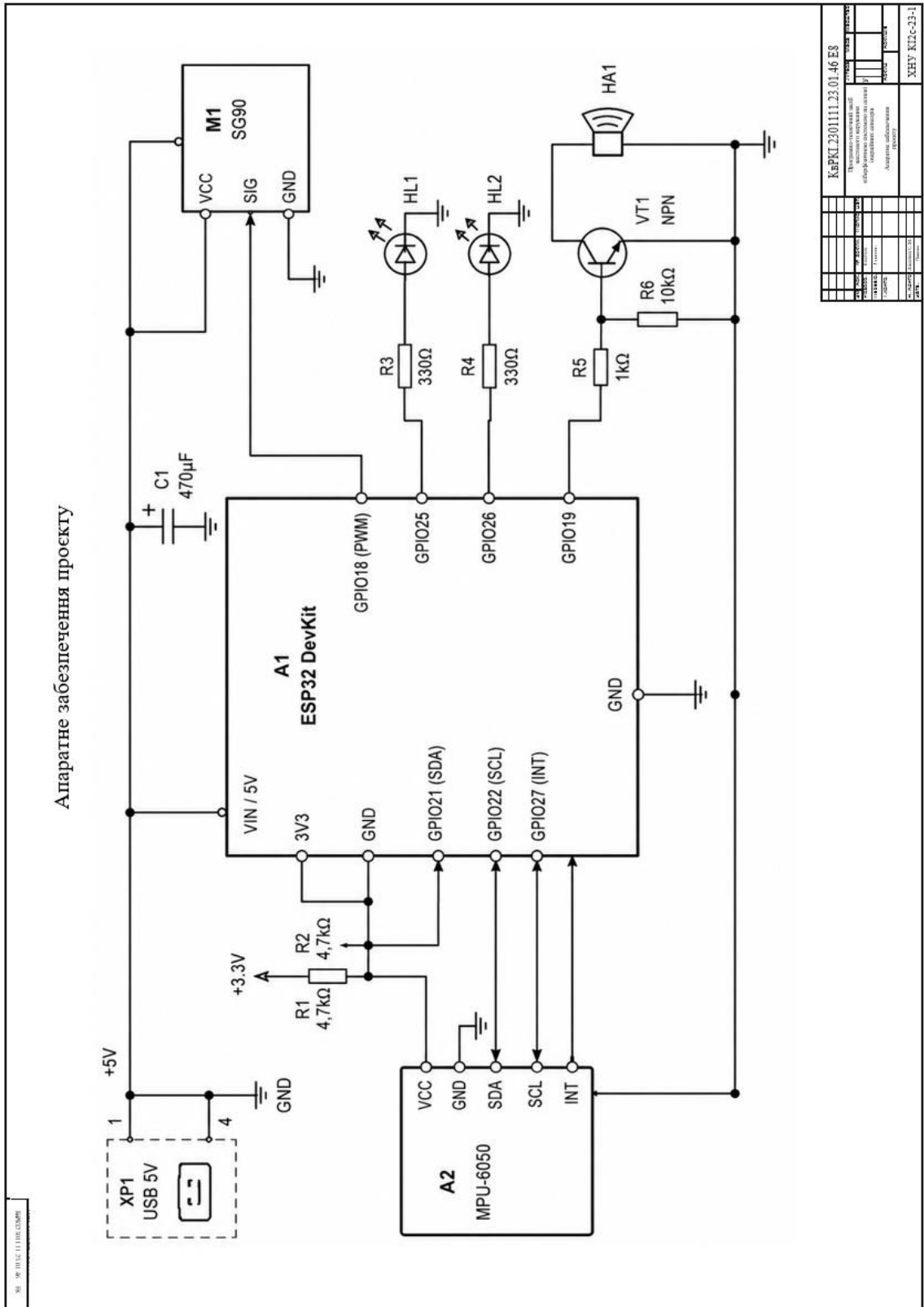
Копія креслення «Архітектура ПЗ проєкту»



ДОДАТОК В

(обов'язковий)

Копія креслення «Апаратне забезпечення проєкту»



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: Владислав КОСТЮК

Співавтор:

Назва: Програмно-технічний засіб жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів

Експерт: Сергій ЛИСЕНКО

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 2.38%

Коефіцієнт подібності 2: 0.37%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-02 05:18:14.0

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.

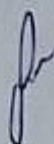
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укріття 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:

2026-06-02

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

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

Максимальне співпадіння з одним документом 30.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Помилки в документах: 8%**

ID: 273058 Назва: БКР Програмно-технічний засіб жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів Додано в БД: 2026-06-01 Автора: Владислав КОСТЮК Керівники: Сергій ЛИСЕНКО Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	118712	890	36495 (31%)	264 (30%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
269576	Назва: Звіт з ПДП Програмно-технічний засіб керування дистанційним металошукачем на основі мікроконтролера ESP32 Додано в БД: 2026-02-27 Автора: В.М.Костюка Керівники: Капустян М.В. Консультанти: Опоненти:	35821 (30.0%)	266 (30.0%)

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Костюк Владислав Михайлович

Тема: Програмно-технічний засіб жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 63

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розроблення програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів. У роботі досліджено сучасні підходи до реалізації жестового керування, виконано проєктування структури програмно-технічного засобу, обґрунтовано вибір апаратних і програмних компонентів та реалізовано прототип системи на базі мікроконтролерної платформи ESP32 та інерційного сенсора.
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 аналіз предметної області, розглянуто особливості кіберфізичних систем та людино-машинних інтерфейсів, виконано аналіз існуючих підходів до жестового керування технічними системами, досліджено можливості використання інерційних сенсорів для розпізнавання жестів та розглянуто особливості обробки даних акселерометрів і гіроскопів. У другому розділі сформовано концепцію програмно-технічного засобу жестового керування кіберфізичною системою, розроблено модель взаємодії інерційного сенсора, мікроконтролера та керованого об'єкта, спроектовано потік даних від сенсорного модуля до блока прийняття рішень та визначено логіку перетворення рухів користувача у керуючі команди. У третьому розділі виконано практичну реалізацію програмно-технічного засобу. Здійснено

складання апаратної частини на базі мікроконтролера ESP32 та інерційного модуля, реалізовано зчитування та попередню обробку даних сенсорів, виконано фільтрацію та стабілізацію вимірювань, а також розроблено програмний алгоритм визначення жестів користувача і формування керуючих команд для кіберфізичної системи.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага до експериментального порівняння ефективності розробленого засобу з існуючими аналогами.

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 достатньому науково-технічному рівні.


8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно (D / 70)

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

Степан Миколай Васильович, Р/Д, С Викладач
к-ф. кібербезпеки

„03” 06 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КІС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Владислав КОСТЮК

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи К12с-2-1

ЗАЯВА

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

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

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

1 травня 2026 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Програмно-технічний засіб жестового керування кіберфізичною системою на основі інерційних сенсорів
 Автор Владислав КОСТЮК
 Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
 Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
 Науковий керівник: д.т.н. проф. Сергій ЛИСЕНКО

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, розмішені 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 розмішені 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 2,38%; та системою Anti-Plagiarism складає 30%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

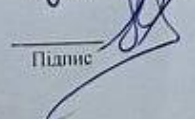
Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис


Підпис


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Сергій ЛИСЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ