

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Кіберфізична система «Розумний кардіостимулятор» (регулювання роботи серця на основі біохімічних показників)  
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 022035.22.01.51 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група KI2-22-2

КОЗЕНКО

Вадим КОЗЕНКО

Підпис

Ініціали, прізвище

Керівник асистент  
Науковий ступінь, учене звання

КЛЕЙН

Олександр КЛЕЙН

Підпис

Ініціали, прізвище

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

КИСІЛЬ

Тетяна КИСІЛЬ

Підпис

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри КПС  
«01» червня 2026 р.

ПАВЛОВА

Ольга ПАВЛОВА

Підпис

Ініціали, прізвище

дата

Хмельницький 2026

# 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

Козенку Вадиму Миколайовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система «Розумний кардіостимулятор»  
(регулювання роботи серця на основі біохімічних показників)

Керівник проекту (роботи) Олександр Клейн, асистент

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

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Аналіз предметної області. огляд технологій та підходів до побудови кіберфізичних систем регулювання серцевого ритму

Проектування кіберфізичної системи «Розумний кардіостимулятор», включаючи розробку структури системи, вибір апаратних компонентів та алгоритмів обробки біохімічних показників

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи, розробка програмного забезпечення, створення веб-інтерфейсу моніторингу та проведення тестування системи

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

Загальна структурна схема кіберфізичної системи «Розумний кардіостимулятор»

Схема апаратної реалізації системи (мікроконтролер, сенсори, модулі зв'язку)

Модуль бездротового зв'язку (nRF52832)

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проєктування кіберфізичної системи «Розумний кардіостимулятор»	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – проєктування та програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи «Розумний кардіостимулятор»	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2026	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач Козенко Вадим КОЗЕНКО  
Підпис Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи Клейн Олександр Клейн  
Підпис Імя, ПРІЗВИЩ



## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система «Розумний кардіостимулятор» (регулювання роботи серця на основі біохімічних показників)».

Автор роботи: Вадим КОЗЕНКО.

Керівник роботи: Олександр Клейн.

Пояснювальна записка: 59 с., 15 рис., 1 табл., 3 дод., 54 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

Адаптивне керування, біохімічні показники, вбудована система, веб-Інтерфейс, кардіостимулятор, кіберфізична система, медичний моніторинг, мікроконтролер, реальний час, сенсори.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробленню кіберфізичної системи «Розумний кардіостимулятор», призначеної для адаптивного регулювання роботи серця на основі аналізу фізіологічних і біохімічних показників організму. Актуальність теми зумовлена потребою у вдосконаленні підходів до кардіостимуляції, оскільки традиційні пристрої переважно працюють за попередньо заданими режимами та не завжди враховують поточний стан організму.





Метою роботи є проектування, програмно-апаратна реалізація та перевірка кіберфізичної системи, яка забезпечує збір, передавання, оброблення й аналіз біохімічних і фізіологічних даних для формування керуючих впливів на роботу кардіостимулятора. У роботі спроектовано структуру кіберфізичної системи, розроблено алгоритми фільтрації вхідних сигналів, класифікації фізіологічного стану та адаптивного формування параметрів стимуляції. Реалізовано програмну частину для збору й оброблення даних та відображення показників у веб-інтерфейсі моніторингу. Проведено перевірку працездатності системи на основних сценаріях роботи.

В. Козенко  
Підпис здобувача

30.05.2026  
Дата

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
1 Аналіз предметної області. Огляд технологій та підходів до побудови кіберфізичних систем регулювання серцевого ритму.....	6
1.1 Актуальність використання кіберфізичних систем у сучасній кардіології.....	6
1.2 Аналіз сучасних апаратних та програмних рішень для реалізації систем кардіостимуляції .....	11
1.3 Постановка задачі .....	16
1.4 Висновки.....	17
2 Проектування кіберфізичної системи розумний кардіостимулятор.....	20
2.1 Визначення мети та вимог до системи .....	20
2.2 Розробка загальної структури кіберфізичної системи.....	23
2.3 Розробка схеми електричної принципової та апаратної частини системи.....	26
2.4 Розробка алгоритмів функціонування кіберфізичної системи .....	33
2.5.1 Аналіз обраних апаратних рішень та їх технічних характеристик .....	36
2.5.2 Аналіз обраних програмних рішень .....	37
2.6 Висновки.....	38
3 Проектування кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор .....	41
3.1 Огляд використовуваних програмних засобів та бібліотек .....	41
3.2 Розробка програмного коду для забезпечення функціонування кіберфізичної системи у режимі реального часу.....	44
3.3 Розробка веб-інтерфейсу моніторингу та візуалізація даних у режимі реального часу.....	49
3.4 Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи .....	52
Висновки.....	60

КВРКІ.022035.22.01.51 ПЗ				
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
Виконав		КОЗЕНКО В.		
Перевір.		КЛЕЙН О.		
Н.контр.		Тетяна КИСЛІЬ		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		
Кіберфізична система «Розумний кардіостимулятор» (регулювання роботи серця на основі біохімічних показників)			Літера у	Аркуш 2
			Аркушів 59	
ХНУ КІ2-22-2				

Перелік джерел посилань.....	62
Додаток А Копія креслення«Загальна структура кіберфізичної системи».....	68
Додаток Б Копія креслення«Блок-схема алгоритму роботи кіберфізичної систем».....	69
Додаток В Копія креслення «Модуль бездротового зв'язку nRF52832».....	70

## ВСТУП

Сучасна кардіологія дедалі частіше стикається з викликом не просто підтримання життєдіяльності пацієнта, а забезпечення високої якості цього життя. Для людей із порушеннями серцевого ритму єдиним ефективним рішенням залишається імплантація електрокардіостимулятора. Однак традиційні пристрої працюють за жорстко заданими алгоритмами і не здатні адаптуватися до поточних метаболічних потреб організму, які змінюються під час фізичного навантаження, стресу, сну чи відновлення. Це може призводити до дискомфорту, зниження толерантності до навантажень та загального погіршення самопочуття пацієнта.

Вирішенням цієї проблеми стає впровадження кіберфізичних систем у медичну практику. Кіберфізичні системи органічно поєднують апаратні засоби (сенсори, виконавчі механізми) з програмним забезпеченням, здатним аналізувати дані в реальному часі та приймати рішення. Застосування такого підходу в кардіостимуляції дозволяє створити «розумний» пристрій, який не просто генерує імпульси із заданою частотою, а аналізує біохімічні показники (частоту серцевих скорочень, насичення крові киснем, рівень лактату та адреналіну) і на їх основі підбирає оптимальний режим стимуляції, імітуючи природну роботу синусового вузла здорового серця.

Метою цієї дипломної роботи є розробка, реалізація та тестування працездатної кіберфізичної системи «Розумний кардіостимулятор», здатної регулювати частоту серцевих скорочень на основі аналізу біохімічних показників організму в режимі реального часу.

Об'єктом дослідження є процеси автоматичного регулювання серцевого ритму в залежності від фізіологічного стану людини.

Предметом дослідження виступають технічні й програмні засоби, методи збору, передачі, обробки та аналізу біохімічних даних, а також алгоритми

прийняття рішень, що забезпечують ефективне функціонування адаптивної кіберфізичної системи кардіостимуляції.

Практична значимість отриманих результатів визначається можливістю їх використання у сфері розробки медичних пристроїв. Розроблена система може стати прототипом для подальших досліджень у галузі адаптивної кардіостимуляції, а також слугувати основою для впровадження нових підходів до персоналізованого лікування серцево-судинних захворювань.

Структура роботи відображає логічний розподіл дослідження: перший розділ присвячено аналізу предметної області та постановці задачі; у другому розділі здійснено проектування системи та вибір компонентів; третій розділ містить опис програмно-апаратної реалізації та результати тестування.

Сучасний рівень розвитку мікроелектроніки, вбудованих систем та технологій бездротового зв'язку створює об'єктивні передумови для розробки нового покоління інтелектуальних медичних пристроїв. Мініатюризація компонентів, зниження їхнього енергоспоживання та підвищення обчислювальної потужності відкривають можливості для реалізації складних алгоритмів обробки даних безпосередньо у вбудованих системах, що раніше було доступне лише стаціонарному медичному обладнанню.

Особливої значущості набуває міждисциплінарний характер роботи, яка поєднує знання з галузей комп'ютерної інженерії, медичної електроніки, цифрової обробки сигналів та фізіології людини. Такий підхід дозволяє створити технічне рішення, що максимально відповідає реальним клінічним потребам, та забезпечує його практичну застосовність у медичній практиці.

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ. ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПІДХОДІВ ДО ПОБУДОВИ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ СЕРЦЕВОГО РИТМУ

## 1.1 Актуальність використання кіберфізичних систем у сучасній кардіології

У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій та вбудованих систем особливої актуальності набуває створення кіберфізичних систем медичного призначення, які забезпечують інтеграцію процесів збору, обробки та аналізу даних у реальному часі. Одним із перспективних напрямів є розробка інтелектуальних систем кардіостимуляції, здатних адаптивно регулювати роботу серця на основі комплексного аналізу фізіологічних параметрів.

Кіберфізична система «розумний кардіостимулятор» являє собою складну інтегровану систему, що поєднує сенсорні модулі, обчислювальні компоненти та виконавчі пристрої в єдиному контурі керування. Фізичний рівень системи представлений біологічним об'єктом серцево-судинною системою людини, а також сенсорами, які здійснюють вимірювання відповідних параметрів. Обчислювальний рівень включає вбудовані мікроконтролерні пристрої та алгоритми обробки сигналів, що забезпечують аналіз отриманих даних і формування керуючих впливів [1].

Особливістю кіберфізичного підходу є наявність замкненого циклу керування із зворотним зв'язком, у якому результати вимірювань безпосередньо впливають на роботу виконавчого пристрою. У контексті кардіостимуляції це означає, що параметри стимуляції серця змінюються динамічно відповідно до поточного стану організму, що визначається на основі обробки вхідних даних.

На відміну від традиційних рішень, у запропонованій системі передбачається використання біохімічних показників як інформативних параметрів для прийняття рішень. До таких показників можуть належати рівні

лактату, адреналіну, насичення крові киснем та інші характеристики, які відображають метаболічний та фізіологічний стан організму. Дані сенсорів надходять до обчислювального модуля, де проходять попередню обробку, фільтрацію, нормалізацію та подальший аналіз із застосуванням алгоритмів адаптивного керування [2].

Використання алгоритмічних методів обробки даних дозволяє реалізувати інтелектуальні функції системи, зокрема прогнозування змін стану пацієнта та автоматичне налаштування параметрів стимуляції. Це забезпечує більш точне та своєчасне реагування на зміну фізіологічних умов, а також підвищує ефективність функціонування кардіостимулятора в різних режимах роботи [3].

Алгоритм фільтрації вхідних сигналів реалізовано на основі рухомого середнього з адаптивним вікном усереднення. Розмір вікна автоматично коригується залежно від дисперсії вхідного сигналу: при значній варіативності вікно зменшується для підвищення швидкодії, а при стабільному сигналі збільшується для зниження рівня шумів. Такий підхід забезпечує оптимальний баланс між точністю вимірювань і часом відгуку системи [4].

Для класифікації фізіологічного стану пацієнта застосовано алгоритм порогової класифікації з гістерезисом. Використання гістерезису запобігає частому перемиканню між режимами роботи при незначних коливаннях вхідних параметрів навколо граничних значень. Граничні значення класифікатора визначаються індивідуально на етапі налаштування системи та можуть бути скориговані лікарем через інтерфейс моніторингу [5].

Алгоритм генерації стимулюючих імпульсів реалізовано з використанням апаратного таймера мікроконтролера, що забезпечує точність тимчасових інтервалів стимуляції на рівні мікросекунд. Параметри імпульсів тривалість, амплітуда та міжімпульсний інтервал динамічно змінюються відповідно до поточного алгоритмічного рішення системи. Це дозволяє адаптувати

стимуляцію до індивідуальних особливостей пацієнта та поточного стану серцево-судинної системи [6].

Важливим аспектом при розробці кіберфізичної системи є обмеженість обчислювальних ресурсів та енергоспоживання вбудованих пристроїв. Це обумовлює необхідність оптимізації алгоритмів, зменшення обсягу обчислень та забезпечення надійності функціонування системи в реальному часі. Крім того, необхідно враховувати вимоги до безпеки та відмовостійкості, оскільки система безпосередньо впливає на життєво важливі функції організму.

Таким чином, розробка кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» є актуальним завданням комп'ютерної інженерії, що передбачає інтеграцію сенсорних технологій, вбудованих систем та інтелектуальних алгоритмів обробки даних для забезпечення адаптивного керування роботою серця на основі біохімічних показників [7].

Додатково важливим елементом кіберфізичної системи є організація ефективної взаємодії між її компонентами, що включає передачу даних від сенсорних модулів до обчислювального ядра та формування керуючих сигналів для виконавчого пристрою. У таких системах можуть використовуватися як дротові, так і бездротові інтерфейси зв'язку, що повинні забезпечувати високу надійність передачі даних, мінімальні затримки та енергоефективність [8].

Обробка сигналів, отриманих із сенсорів, передбачає застосування методів цифрової фільтрації, усунення шумів та артефактів, а також виділення інформативних ознак. Це є необхідним для підвищення точності подальшого аналізу та забезпечення стабільної роботи алгоритмів керування. Особливу увагу слід приділяти синхронізації даних, отриманих із різних джерел, оскільки некоректне узгодження часових параметрів може призвести до помилок у прийнятті рішень [9].

З огляду на специфіку медичних застосувань, кіберфізична система повинна відповідати вимогам надійності, безпеки та відмовостійкості. Це передбачає використання механізмів контролю цілісності даних, резервування

критичних компонентів, а також реалізацію алгоритмів виявлення та обробки помилок. У випадку виникнення нештатних ситуацій система повинна переходити в безпечний режим роботи з мінімальним ризиком для пацієнта [10].

Не менш важливим є питання масштабованості та можливості модернізації системи. Архітектура кіберфізичної системи повинна бути побудована таким чином, щоб забезпечити можливість підключення додаткових сенсорів або оновлення алгоритмів без суттєвих змін у базовій структурі. Це дозволяє адаптувати систему до нових вимог та розширювати її функціональні можливості [11].

Отже, розробка кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» потребує комплексного підходу, що охоплює не лише вибір сенсорів і алгоритмів обробки даних, але й проектування ефективної архітектури системи, забезпечення надійної комунікації між її компонентами та дотримання вимог до безпеки і енергоефективності. Це робить дану задачу характерною для галузі комп'ютерної інженерії та підтверджує її актуальність у контексті розвитку сучасних інтелектуальних медичних систем [12].

Особливої уваги заслуговує питання стандартизації та сертифікації медичних кіберфізичних систем. Розробка кардіостимуляторів нового покоління вимагає дотримання міжнародних стандартів безпеки, зокрема ІЕС 60601 та ISO 14708, що регламентують вимоги до електромагнітної сумісності, надійності, захисту від збоїв та біосумісності компонентів. Виконання цих вимог є обов'язковою умовою для практичного застосування розробленої системи [13].

Серед перспективних напрямків розвитку кіберфізичних систем медичного призначення особливе місце займають технології машинного навчання та нейронних мереж. Їх застосування у системах кардіостимуляції дозволяє реалізувати предикативний аналіз стану пацієнта та завчасно коригувати параметри стимуляції, що суттєво підвищує ефективність терапії та мінімізує ризик виникнення ускладнень [14].

З точки зору кібербезпеки, бездротові медичні пристрої є потенційними об'єктами несанкціонованого доступу. Тому забезпечення захисту каналів передачі даних, автентифікація учасників обміну інформацією та використання криптографічних протоколів є невід'ємними елементами сучасної кіберфізичної системи кардіостимуляції, що гарантують конфіденційність медичних даних та цілісність керуючих команд [15].

Розвиток технологій Internet of Things (IoT) відкриває нові можливості для побудови розподілених медичних систем моніторингу. Інтеграція кардіостимулятора у загальну екосистему персональних медичних пристроїв дозволяє отримувати комплексну картину стану здоров'я пацієнта, об'єднуючи дані від фітнес-трекерів, розумних годинників та інших носимих пристроїв. Це відкриває шлях до більш точної діагностики та персоналізованого лікування [16].

Хмарні технології обробки даних відіграють дедалі більшу роль у сучасній медицині. Передача деідентифікованих медичних даних на хмарні платформи дозволяє накопичувати великі обсяги клінічної інформації для навчання алгоритмів машинного навчання та статистичного аналізу популяційних тенденцій. Для кардіостимуляторів нового покоління інтеграція з хмарними сервісами може забезпечити можливість дистанційного моніторингу та коригування параметрів лікарем без необхідності візиту пацієнта до клініки [17].

Окремим актуальним напрямком є розробка алгоритмів виявлення аномалій у роботі серця з використанням методів статистичного аналізу та машинного навчання. Реалізація таких функцій у кіберфізичній системі кардіостимулятора є перспективним напрямком, що безпосередньо впливає на якість та безпеку лікування [18].

Питання взаємодії людини та машини (Human-Machine Interaction) також набуває важливості у контексті медичних кіберфізичних систем. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для лікаря, зручна система сповіщень та зрозуміла

візуалізація даних дозволяють мінімізувати ймовірність помилок при налаштуванні та моніторингу роботи пристрою. Це підвищує загальну ефективність системи та сприяє її прийняттю медичним персоналом [19].

## 1.2 Аналіз сучасних апаратних та програмних рішень для реалізації систем кардіостимуляції

Аналіз сучасних систем кардіостимуляції показує, що більшість існуючих рішень реалізовані у вигляді вбудованих систем із обмеженим набором функціональних можливостей та фіксованими або напіваадаптивними алгоритмами керування. Такі системи, як правило, орієнтовані на обробку електрофізіологічних сигналів, зокрема електрокардіограми, та забезпечують підтримання заданого рівня частоти серцевих скорочень у межах попередньо визначених режимів [20].

Сучасні кардіостимулятори можуть включати додаткові сенсори, що реєструють фізичну активність або параметри дихання, що дозволяє реалізувати базові механізми адаптації [21]. Проте обчислювальні алгоритми, які використовуються в таких пристроях, здебільшого мають обмежену складність та не забезпечують глибокого аналізу багатовимірних даних [22]. Це пов'язано з обмеженнями апаратних ресурсів, зокрема продуктивності мікроконтролерів, обсягу пам'яті та енергоспоживання [23].

Однією з ключових проблем існуючих систем є використання вузького набору вхідних параметрів для прийняття рішень. З інженерної точки зору це означає недостатню інформативність вхідного вектора даних, що знижує точність алгоритмів керування [24]. Зокрема, біохімічні показники, які можуть слугувати важливими індикаторами фізіологічного стану організму, практично не використовуються в існуючих рішеннях через складність їх вимірювання та інтеграції у вбудовані системи [25].

Крім того, традиційні алгоритми керування не враховують динамічний характер змін стану організму та мають обмежені можливості адаптації в реальному часі [26]. У більшості випадків використовуються порогові або лінійні моделі, які не забезпечують достатньої гнучкості при зміні умов функціонування. Це може призводити до затримок у реакції системи або до формування не оптимальних керуючих впливів [27].

З розвитком технологій вбудованих систем та обробки даних з'являються передумови для впровадження більш складних алгоритмів, зокрема методів адаптивного керування, машинного навчання та аналізу багатовимірних сигналів [28]. Такі підходи дозволяють розширити функціональні можливості кардіостимуляторів, забезпечити більш точне моделювання стану пацієнта та підвищити ефективність прийняття рішень [29].



Рисунок 1.1 – Структурна схема традиційного кардіостимулятора

Водночас впровадження інтелектуальних алгоритмів у кіберфізичних системах обмежується вимогами до обчислювальної ефективності, енергоспоживання та надійності [30]. Це потребує оптимізації програмної реалізації, використання ефективних структур даних та розробки алгоритмів, здатних працювати в умовах обмежених ресурсів у режимі реального часу [31].

Таким чином, проведений аналіз свідчить про наявність ряду технічних обмежень у сучасних системах кардіостимуляції, зокрема недостатню інтеграцію сенсорних даних, обмежені можливості обробки інформації та відсутність використання біохімічних показників як вхідних параметрів [32].

Це обґрунтовує необхідність розробки кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор», яка забезпечує комплексний підхід до збору та обробки даних, використання інтелектуальних алгоритмів та реалізацію адаптивного керування роботою серця в реальному часі [33]. Основні недоліки існуючих систем кардіостимуляції

До основних недоліків сучасних систем кардіостимуляції належать: обмеженість вхідних даних; більшість систем використовує лише електрокардіографічні сигнали або окремі фізіологічні параметри, що не дозволяє сформувати повноцінну модель стану організму; відсутність інтеграції біохімічних показників знижує точність алгоритмів керування [34]; низький рівень адаптивності; використання простих алгоритмів, заснованих на порогових значеннях або заздалегідь визначених сценаріях, обмежує здатність системи ефективно реагувати на швидкі зміни стану пацієнта; обмежені обчислювальні ресурси; вбудовані системи мають обмежену продуктивність, що ускладнює реалізацію складних алгоритмів обробки даних; відсутність комплексної обробки даних; відсутні механізми інтеграції інформації з різних сенсорів, що призводить до втрати важливих даних; проблеми масштабованості; замкнена архітектура ускладнює модернізацію та розширення функціоналу систем [35].



Рисунок 1.2 – Порівняння традиційного та інтелектуального підходів до кардіостимуляції

Отже, результати аналізу підтверджують необхідність переходу від традиційних систем кардіостимуляції до кіберфізичних рішень нового покоління, які базуються на комплексній обробці даних, використанні біохімічних показників та впровадженні інтелектуальних алгоритмів керування [36]. Це створює передумови для розробки ефективної системи «розумний кардіостимулятор», орієнтованої на персоналізоване та адаптивне керування роботою серця [37].

Порівняльний аналіз ринкових рішень провідних виробників, зокрема Medtronic, Abbott та Biotronik, свідчить про те, що навіть найсучасніші комерційні кардіостимулятори не забезпечують повноцінної інтеграції біохімічних сенсорів. Системи класу CRT (Cardiac Resynchronization Therapy) [38] та ICD (Implantable Cardioverter-Defibrillator) мають розширені функції моніторингу, проте зосереджені переважно на електрофізіологічних параметрах, залишаючи метаболічні показники поза увагою [39].

Аналіз науково-технічної літератури свідчить про зростання інтересу дослідників до концепції замкнутого контуру керування серцевою діяльністю. Низка публікацій у провідних фахових виданнях підтверджує технічну доцільність використання рівня лактату, рН крові та показників насичення киснем як інформативних параметрів для адаптації частоти стимуляції [40].

Проте відсутність комплексних апаратних реалізацій свідчить про актуальність проведеного дослідження [41].

Важливим аспектом аналізу є оцінка енергоефективності сучасних вбудованих систем. Застосування мікроконтролерів з надниз'ким енергоспоживанням, оптимізованих протоколів бездротового зв'язку (зокрема BLE 5.x) та режимів глибокого сну дозволяє суттєво збільшити термін автономної роботи імплантованого пристрою [42]. Це є критичним показником для медичних застосувань, де заміна елементів живлення пов'язана з хірургічним втручанням [43]. Серед програмних рішень, що використовуються у сучасних медичних вбудованих системах, особливе місце займають операційні системи реального часу (RTOS). Застосування RTOS, зокрема FreeRTOS або Zephyr, дозволяє забезпечити детерміновану реакцію на зовнішні події та гарантувати виконання критичних задач у встановлені часові інтервали [44]. Це є принципово важливим для систем кардіостимуляції, де затримка у формуванні стимулюючого імпульсу може мати медичні наслідки [45].

Протоколи передачі медичних даних також суттєво впливають на функціональність сучасних кардіологічних пристроїв. Стандарт IEEE 11073 визначає формати обміну даними між медичними пристроями та інформаційними системами охорони здоров'я, забезпечуючи їх сумісність та можливість інтеграції у загальну медичну інфраструктуру [46]. Підтримка таких стандартів є необхідною умовою для практичного застосування розробленого пристрою у реальних клінічних умовах [47].

Аналіз патентних баз даних у сфері адаптивної кардіостимуляції свідчить про активну дослідницьку діяльність провідних медичних компаній [48]. Зокрема, ряд патентів описує методи використання біохімічних показників для регулювання параметрів стимуляції, однак більшість із них залишаються на стадії концептуальних розробок або лабораторних прототипів [49]. Це підтверджує новизну та актуальність підходу, реалізованого у даній кваліфікаційній роботі [50].

### 1.3 Постановка задачі

На основі проведеного аналізу сучасних систем кардіостимуляції та виявлених недоліків актуальним є завдання розробки кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор», яка забезпечує адаптивне керування роботою серця на основі комплексного аналізу фізіологічних, зокрема біохімічних, показників у реальному часі.

Метою даної роботи є підвищення ефективності кардіостимуляції шляхом створення інтелектуальної системи, здатної здійснювати збір, обробку та аналіз багатовимірних даних, а також формувати керуючі впливи відповідно до поточного стану організму.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– проаналізувати особливості функціонування серцево-судинної системи як об'єкта керування та визначити основні параметри, що впливають на її роботу;

– визначити склад та структуру вхідних даних, зокрема електрофізіологічних і біохімічних показників, які можуть бути використані для оцінки стану організму;

– розробити структурну схему кіберфізичної системи, що включає сенсорні модулі, обчислювальний блок та виконавчий пристрій;

– розробити алгоритм прийняття рішень для адаптивного керування параметрами кардіостимуляції на основі аналізу вхідних даних;

– забезпечити реалізацію алгоритмів у середовищі вбудованих систем з урахуванням обмежень обчислювальних ресурсів та енергоспоживання;

Особливу увагу необхідно приділити забезпеченню стійкості алгоритмів до похибок вимірювання та зовнішніх завад. У зв'язку з цим передбачається використання методів цифрової фільтрації та адаптивної обробки сигналів, що дозволяє підвищити точність визначення стану організму. Крім того, необхідно

враховувати можливість виникнення нештатних ситуацій, у яких система повинна переходити до безпечного режиму функціонування.

Таким чином, постановка задачі передбачає не лише визначення загальної структури та функцій кіберфізичної системи, але й формування вимог до її алгоритмічного забезпечення, швидкодії, надійності та енергоефективності. Це дозволяє розглядати розробку «розумного кардіостимулятора» як комплексну інженерну задачу, що охоплює питання обробки сигналів, побудови вбудованих систем та реалізації адаптивного керування в умовах обмежених ресурсів.

У результаті виконання роботи передбачається розробка структурної та алгоритмічної моделі кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор», яка забезпечує підвищення точності та ефективності керування серцевим ритмом за рахунок використання розширеного набору вхідних даних та інтелектуальних методів їх обробки.

Важливою складовою постановки задачі є визначення критеріїв якості функціонування розробленої системи. Основними показниками ефективності є час реакції системи на зміну фізіологічного стану (не більше 200 мс), точність визначення поточного режиму роботи організму (не менше 90%) та надійність передачі даних через бездротовий канал зв'язку.

Для досягнення поставленої мети у роботі застосовуються методи системного аналізу, цифрової обробки сигналів, об'єктно-орієнтованого проектування програмного забезпечення, а також методи верифікації та тестування вбудованих систем. Комплексне застосування зазначених методів дозволяє забезпечити науково обґрунтований підхід до розробки кожного компонента системи.

#### 1.4 Висновки до першого розділу

У першому розділі було проведено аналіз предметної області, що стосується побудови кіберфізичних систем кардіостимуляції, а також

розглянуто сучасний стан розвитку відповідних апаратних та програмних засобів. Встановлено, що традиційні кардіостимулятори реалізуються у вигляді вбудованих систем із обмеженим набором вхідних параметрів та спрощеними алгоритмами керування, що не дозволяє повною мірою враховувати фізіологічний стан організму.

У результаті аналізу визначено, що існуючі рішення характеризуються недостатнім рівнем адаптивності, обмеженими можливостями обробки багатовимірних даних та відсутністю використання біохімічних показників як інформативних параметрів для прийняття рішень. Це призводить до зниження ефективності кардіостимуляції та обмежує можливості персоналізації роботи пристрою.

Показано, що застосування кіберфізичного підходу дозволяє інтегрувати процеси збору, обробки та аналізу даних у єдину систему з замкненим контуром керування та зворотним зв'язком. Такий підхід забезпечує можливість реалізації адаптивного керування роботою серця в реальному часі на основі комплексного аналізу фізіологічних параметрів.

У межах розділу сформульовано постановку задачі, яка передбачає розробку кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор», що забезпечує використання біохімічних показників як вхідних даних, реалізацію алгоритмів їх обробки та формування керуючих сигналів для адаптивного регулювання частоти серцевих скорочень.

Результати проведеного аналізу обґрунтовують доцільність розробки нових підходів до побудови систем кардіостимуляції, орієнтованих на використання сучасних методів обробки даних, вбудованих систем та інтелектуальних алгоритмів керування. Отримані результати є основою для подальшого проєктування структури та функціональних компонентів кіберфізичної системи, що розглядається у наступному розділі.

Проведений аналіз також дозволяє сформулювати ряд технічних обмежень, які необхідно враховувати при проєктуванні системи. Зокрема,

розміщення пристрою в організмі людини висуває суворі вимоги до мініатюризації компонентів, а також до біосумісності матеріалів корпусу та електродів. Крім того, необхідно забезпечити захист від впливу зовнішніх електромагнітних полів та вологи.

Підсумовуючи результати першого розділу, можна констатувати, що розробка кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» є актуальною та перспективною задачею. Систематичний аналіз існуючих рішень дозволив сформулювати чіткі вимоги до нової системи, визначити технічні обмеження та окреслити напрямки вдосконалення відносно існуючих аналогів.

					КВРКІ.022035.22.01.51 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ «РОЗУМНИЙ КАРДІОСТИМУЛЯТОР»

### 2.1 Визначення мети та вимог до кіберфізичної системи розумного кардіостимулятора

Метою даного етапу проєктування є формування вимог до кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор», яка забезпечує адаптивне регулювання роботи серця на основі аналізу фізіологічних та біохімічних показників організму в режимі реального часу. Визначення вимог є ключовим етапом розробки, оскільки саме на цьому етапі формується загальне уявлення про функціональні можливості системи, її архітектуру, обмеження та умови експлуатації.

Розроблювана система повинна розглядатися як складна вбудована кіберфізична система, що поєднує в собі апаратні та програмні компоненти, об'єднані єдиним алгоритмом функціонування. Основною особливістю такої системи є наявність замкненого контуру керування із зворотним зв'язком, у якому дані про стан об'єкта керування безперервно використовуються для формування керуючих впливів.

У контексті даної роботи об'єктом керування виступає серцево-судинна система людини, а керуючим впливом електричні імпульси, що генеруються кардіостимулятором. Вхідними параметрами системи є сукупність фізіологічних та біохімічних показників, які характеризують стан організму в конкретний момент часу.

До таких показників належать:

- частота серцевих скорочень;
- рівень насичення крові киснем ( $SpO_2$ );
- концентрація біохімічних маркерів (зокрема лактату, адреналіну);
- додаткові параметри, що можуть характеризувати фізичне навантаження або стресовий стан.

					КВРКІ.022035.22.01.51 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	Нолокун.	Підпис.	Дата.		

Аналіз зазначених параметрів дозволяє сформувати більш точне уявлення про стан організму, ніж використання лише електрофізіологічних сигналів, що є характерним для традиційних систем кардіостимуляції.

Функціональні вимоги до кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» визначають перелік задач, які система повинна виконувати. До основних функціональних вимог належать: безперервний збір даних від щонайменше трьох типів біологічних сенсорів з частотою оновлення не менше 10 Гц; реалізація алгоритму адаптивного керування частотою серцевих скорочень у діапазоні від 40 до 180 уд/хв; передача телеметричних даних на зовнішній пристрій моніторингу через бездротовий канал зв'язку; ведення журналу подій із записом усіх змін параметрів стимуляції.

Нефункціональні вимоги охоплюють характеристики якості системи. До них відносяться: час безперервної автономної роботи не менше 5 років при середньому навантаженні; стійкість до зовнішніх електромагнітних полів відповідно до стандарту IEC 60601-1-2; збереження функціональності у температурному діапазоні від 35 до 42°C, що відповідає фізіологічному діапазону температур тіла людини; захист від стороннього доступу з використанням шифрування AES-128.

Окремо формулюються вимоги до надійності та безпечності системи. Ймовірність безвідмовної роботи протягом одного року повинна становити не менше 0,9999, що відповідає міжнародним стандартам для імплантованих медичних пристроїв. У разі виникнення будь-якої несправності система повинна автоматично перейти у безпечний режим роботи з підтриманням базової фіксованої частоти стимуляції та формуванням сигналу тривоги для медичного персоналу.

Розроблювана кіберфізична система «розумний кардіостимулятор» повинна забезпечувати комплексну обробку інформації про стан організму шляхом безперервного збору даних із сенсорних модулів, що вимірюють як електрофізіологічні, так і біохімічні показники. Отримані дані підлягають

попередній обробці, яка включає фільтрацію, усунення шумів та нормалізацію сигналів з метою підвищення точності подальшого аналізу.

Система повинна здійснювати оцінку поточного фізіологічного стану організму на основі сукупності параметрів, враховуючи їх взаємозв'язок та динаміку змін. Це передбачає використання алгоритмів, здатних працювати в умовах невизначеності та обмеженості вхідних даних, що є характерним для медичних вимірювань. На основі результатів аналізу формується керуючий вплив, який визначає параметри роботи кардіостимулятора, зокрема частоту та режим стимуляції.

Важливою умовою функціонування системи є забезпечення роботи в режимі реального часу, що вимагає мінімізації затримок на всіх етапах обробки інформації. Це накладає обмеження на складність алгоритмів та вимагає їх оптимізації з урахуванням обчислювальних можливостей вбудованої платформи.

З урахуванням специфіки застосування, система повинна характеризуватися високим рівнем надійності та відмовостійкості. У випадку виникнення помилок або нестабільної роботи окремих компонентів необхідно передбачити механізми переходу до безпечного режиму функціонування, що гарантує підтримання базових параметрів роботи серця.

Особливе значення має енергоефективність системи, оскільки її функціонування здійснюється від автономного джерела живлення. Це потребує раціонального використання апаратних ресурсів, оптимізації програмних алгоритмів та мінімізації енергоспоживання сенсорних і обчислювальних модулів.

Крім того, система повинна забезпечувати можливість передачі даних до зовнішніх пристроїв для моніторингу та аналізу, що розширює її функціональні можливості та дозволяє реалізувати віддалений контроль стану пацієнта. При цьому необхідно забезпечити захист інформації від несанкціонованого доступу та спотворення.

З точки зору архітектурної побудови, система повинна реалізовуватися за модульним принципом із чітким розподілом функцій між окремими компонентами. Це дозволяє забезпечити гнучкість, масштабованість та можливість подальшої модернізації без суттєвих змін у загальній структурі.

## 2.2 Розробка загальної структури кіберфізичної системи розумного кардіостимулятора

Проектування загальної структури кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» є одним із ключових етапів розробки, оскільки саме на цьому рівні визначаються принципи взаємодії між основними компонентами системи, логіка обробки інформації та формування керуючих впливів. Враховуючи специфіку медичних застосувань, система повинна забезпечувати високу надійність, швидкодію та здатність функціонувати в режимі реального часу.

Запропонована система реалізується як замкнений контур керування із зворотним зв'язком, у якому результати впливу на об'єкт керування безперервно контролюються та використовуються для подальшої корекції роботи. У даному випадку об'єктом керування є серце людини, а керуючим впливом електричні імпульси, що генеруються кардіостимулятором.

Загальна структура системи передбачає інтеграцію декількох функціональних рівнів, що забезпечують послідовну обробку інформації: від отримання даних до формування керуючих сигналів. До складу системи входять сенсорний рівень, блок збору даних, обчислювальний модуль та виконавчий пристрій. Кожен із цих елементів виконує визначену функцію та взаємодіє з іншими компонентами через відповідні інтерфейси.

Узагальнена структурна схема системи відображає основні інформаційні та керуючі потоки між її елементами (рисунок 2.1).

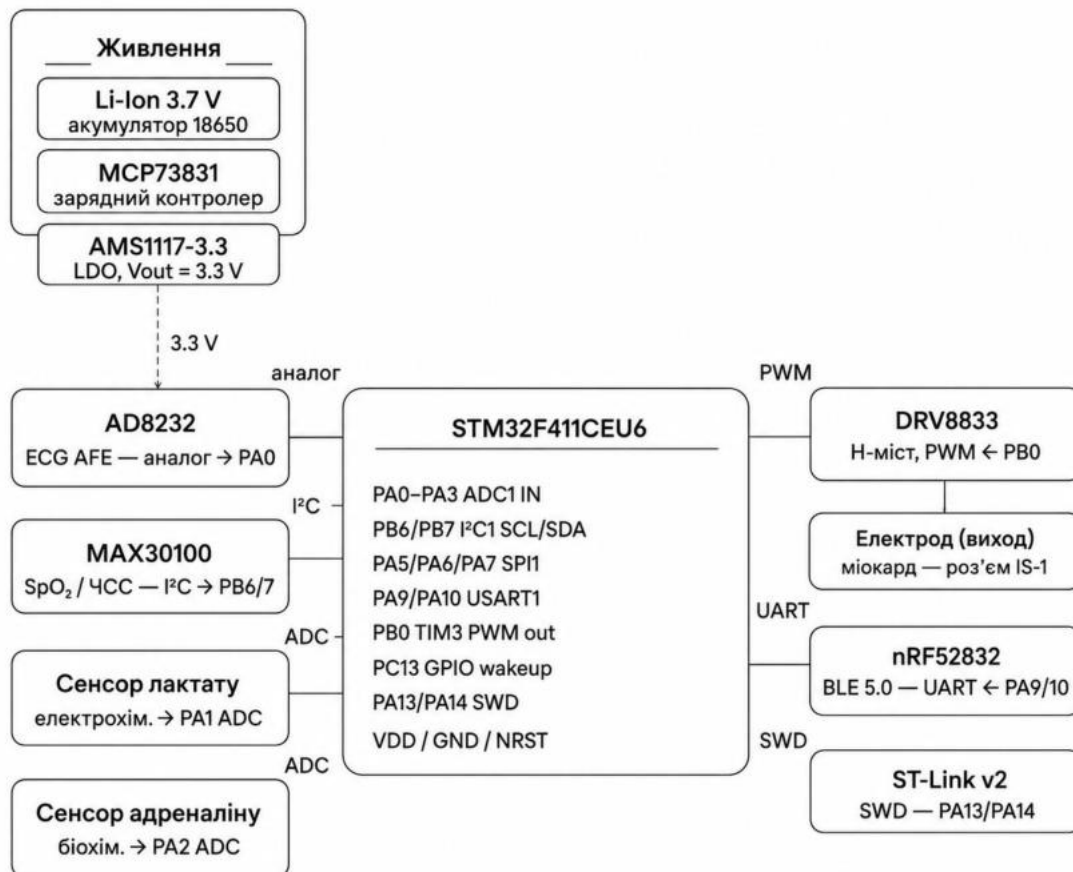


Рисунок 2.1 – Структурна схема кіберфізичної системи розумного кардіостимулятора

Як показано на рисунку 2.1, центральним елементом системи є мікроконтролер, який виконує функції обробки даних та керування. До нього підключені сенсорні модулі, що забезпечують отримання інформації про стан організму, а також виконавчі та комунікаційні пристрої.

Сенсорний рівень системи представлений набором датчиків, які здійснюють вимірювання фізіологічних та біохімічних показників. Зокрема, для отримання електрокардіографічного сигналу використовується аналоговий фронтенд, для визначення рівня насичення крові киснем та частоти серцевих скорочень застосовується пульсоксиметричний сенсор, а для оцінки метаболічного стану організму використовуються біохімічні сенсори, що визначають рівень лактату та адреналіну.



Наявність зворотного зв'язку дозволяє системі оцінювати ефективність сформованих керуючих впливів та коригувати параметри стимуляції залежно від змін стану організму. Це є принциповою відмінністю кіберфізичної системи від традиційних кардіостимуляторів, які працюють за заздалегідь заданими алгоритмами без урахування динаміки біохімічних процесів.

Важливим аспектом побудови структури системи є її модульність. Кожен функціональний блок виконує окрему задачу та взаємодіє з іншими компонентами через чітко визначені інтерфейси. Такий підхід дозволяє спростити процес розробки, підвищити надійність системи та забезпечити можливість її подальшої модернізації.

З урахуванням вимог до вбудованих систем, при проєктуванні структури також враховуються обмеження, пов'язані з енергоспоживанням, обчислювальними ресурсами та швидкодією. Це впливає на вибір компонентів системи та алгоритмів її функціонування.

Таким чином, розроблена структура кіберфізичної системи забезпечує ефективну взаємодію між сенсорними, обчислювальними та виконавчими компонентами, що дозволяє реалізувати адаптивне керування серцевим ритмом на основі аналізу біохімічних показників.

### 2.3 Розробка схеми електричної принципової та апаратної частини системи розумного кардіостимулятора

На етапі реалізації апаратної частини кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» особлива увага приділяється вибору компонентів, їх узгодженню та побудові принципової електричної схеми. Даний етап є ключовим з точки зору комп'ютерної інженерії, оскільки саме тут забезпечується інтеграція мікроконтролерної платформи, сенсорних модулів, виконавчих пристроїв та засобів комунікації в єдину систему.

Розроблена апаратна частина базується на використанні мікроконтролера як центрального обчислювального вузла, що виконує функції збору, обробки та передачі даних, а також формування керуючих сигналів. До нього підключаються сенсори, модулі зв'язку та виконавчі елементи, що забезпечують реалізацію функціональних можливостей системи, зображено на рисунку 2.3.

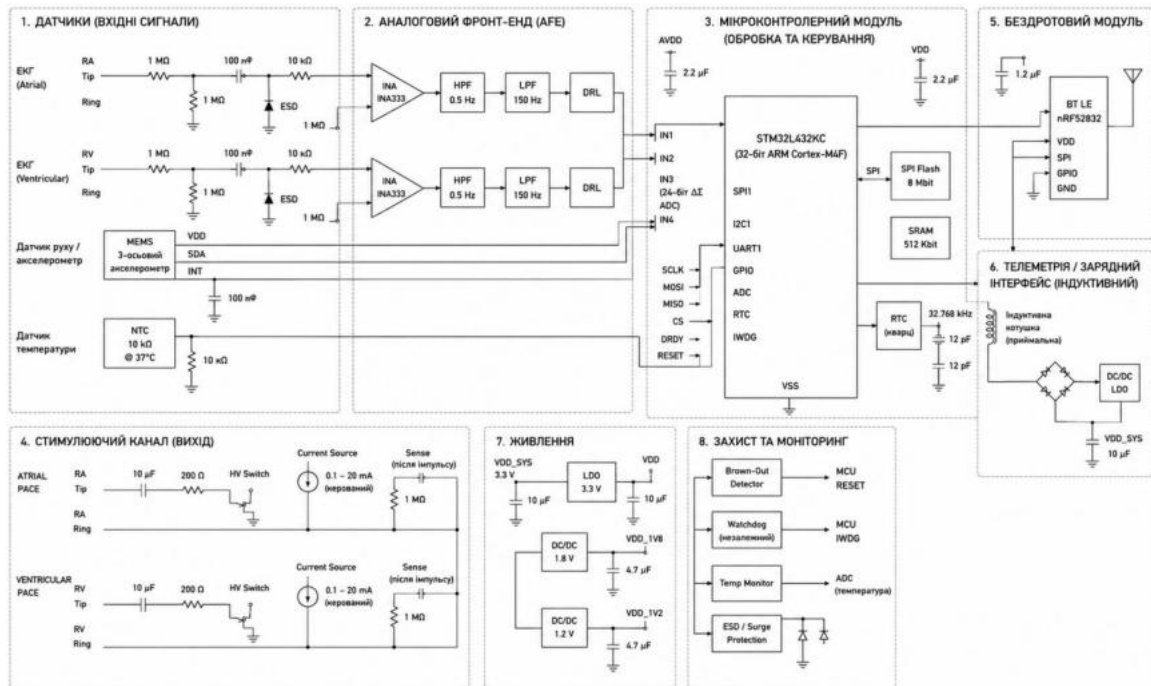


Рисунок 2.3 – Схема електрична принципова кіберфізичної системи «Розумний кардіостимулятор»

Загальна схема електрична принципова системи відображає взаємозв'язки між усіма компонентами та дозволяє оцінити особливості їх взаємодії.

Як показано на рисунку 2.4, центральним елементом системи є мікроконтролер, до якого підключені всі функціональні модулі. Побудова схеми виконана з урахуванням вимог до вбудованих систем, зокрема енергоефективності, компактності та надійності.

Живлення системи здійснюється від літій-іонного акумулятора з номінальною напругою 3,7 В. Для стабілізації напруги використовується лінійний стабілізатор, який забезпечує формування напруги 3,3 В, необхідної

для роботи більшості електронних компонентів. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільну роботу системи незалежно від змін напруги джерела живлення.

Центральний обчислювальний вузол реалізований на базі мікроконтролера сімейства STM32, який поєднує достатню продуктивність із низьким енергоспоживанням. Він забезпечує виконання програмних алгоритмів, обробку сигналів з сенсорів, а також керування виконавчими пристроями. Використання апаратних периферійних модулів, таких як аналого-цифровий перетворювач, таймери та інтерфейси зв'язку, дозволяє ефективно розподілити обчислювальне навантаження та підвищити швидкодію системи.

Підключення сенсорних модулів реалізовано з використанням як аналогових, так і цифрових інтерфейсів. Аналогові сигнали, зокрема від біохімічних сенсорів, подаються безпосередньо на входи аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера. Це дозволяє отримувати цифрове представлення вимірюваних параметрів для подальшої обробки.

Цифрові сенсори, такі як пульсоксиметричний модуль, підключаються через послідовні інтерфейси обміну даними, що забезпечує надійну передачу інформації з мінімальними втратами. Такий підхід дозволяє зменшити вплив завад та підвищити точність вимірювань.

Окрему роль у системі відіграє аналоговий інтерфейс для зняття електрокардіографічного сигналу, який забезпечує попереднє підсилення та фільтрацію сигналу перед його подачею на мікроконтролер. Це дозволяє отримати більш якісні дані для подальшого аналізу.

Формування керуючого сигналу для стимуляції серця здійснюється за допомогою виконавчого модуля, реалізованого у вигляді драйвера з можливістю роботи у режимі широтно-імпульсної модуляції. Використання такого підходу дозволяє точно регулювати параметри вихідного сигналу, що є критично важливим для медичних застосувань.

Передача даних до зовнішніх пристроїв реалізується за допомогою бездротового модуля, що працює за стандартом Bluetooth Low Energy. Це дозволяє забезпечити енергоефективний обмін інформацією та реалізувати функцію віддаленого моніторингу стану пацієнта.

Для налагодження та програмування системи передбачено використання стандартного інтерфейсу відлагодження, що забезпечує можливість завантаження програмного забезпечення та аналізу роботи системи на етапі розробки.

З точки зору комп'ютерної інженерії, важливим аспектом є оптимальне використання апаратних ресурсів мікроконтролера. У розробленій системі реалізовано розподіл функцій між периферійними модулями, що дозволяє мінімізувати навантаження на центральне ядро та забезпечити роботу системи в режимі реального часу.

Таким чином, розроблена схема електрична принципова забезпечує інтеграцію всіх необхідних компонентів кіберфізичної системи та створює апаратну основу для реалізації адаптивного кардіостимулятора, що відповідає вимогам сучасної комп'ютерної інженерії.

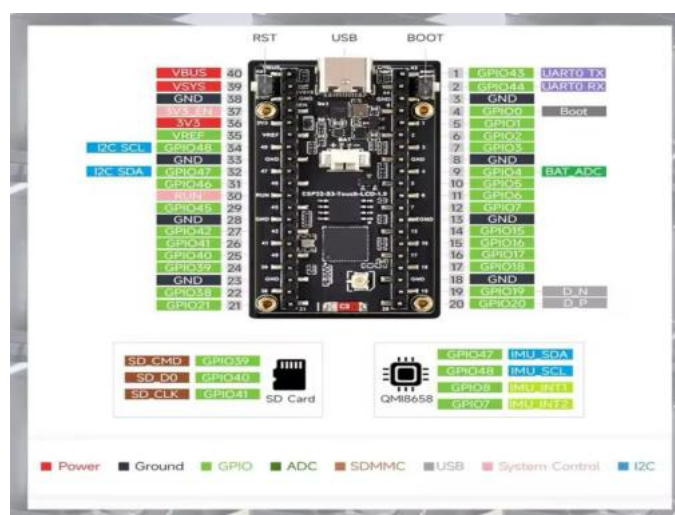


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд мікроконтролера STM32F411CEU6

Мікроконтролер є центральним елементом системи, що забезпечує виконання програмного коду, обробку сигналів та керування всіма периферійними пристроями. Використання сучасної мікроконтролерної платформи дозволяє реалізувати складні алгоритми обробки даних у реальному часі, що є критично важливим для кіберфізичних систем

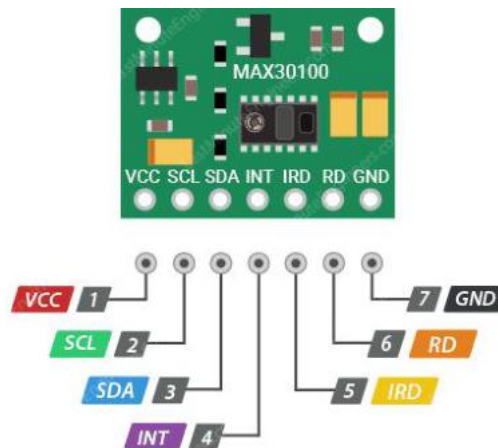
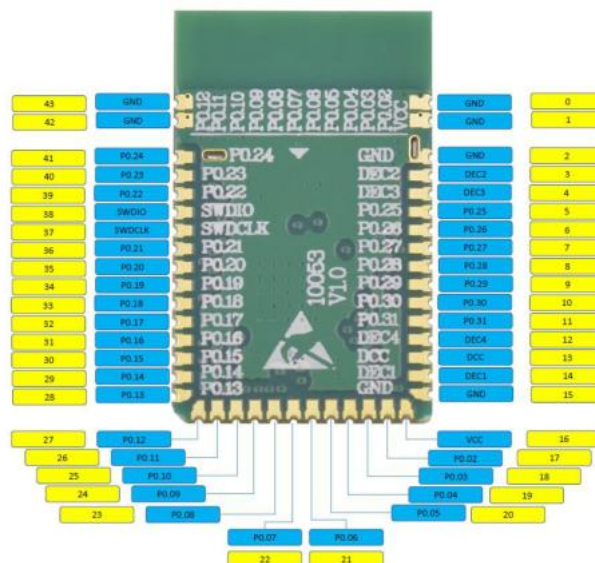


Рисунок 2.5 – Модуль пульсоксиметра MAX30100

Пульсоксиметричний сенсор використовується для вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти серцевих скорочень. Він реалізує оптичний метод вимірювання, що базується на аналізі поглинання світла тканинами організму.



## Рисунок 2.6 – Модуль бездротового зв'язку nRF52832

Комунікаційний модуль забезпечує передачу даних до зовнішніх пристроїв. Використання технології Bluetooth Low Energy дозволяє значно зменшити енергоспоживання системи, що є важливим фактором для автономних медичних пристроїв. Крім того, дана технологія підтримує стабільний обмін даними на невеликих відстанях із мінімальною затримкою, що дозволяє реалізувати моніторинг стану пацієнта в режимі реального часу.

Передача інформації здійснюється у вигляді пакетів даних, що містять значення фізіологічних та біохімічних параметрів, а також службову інформацію про стан системи. Це забезпечує можливість інтеграції пристрою з мобільними застосунками або спеціалізованими медичними системами для подальшого аналізу та зберігання даних.

Окрім цього, використання бездротового зв'язку спрощує процес налаштування системи та дозволяє змінювати режими роботи кардіостимулятора без необхідності фізичного доступу до пристрою. Це підвищує зручність експлуатації та розширює функціональні можливості розробленої кіберфізичної системи.

					КВРКІ.022035.22.01.51 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	Нолокум.	Підпис.	Дата		

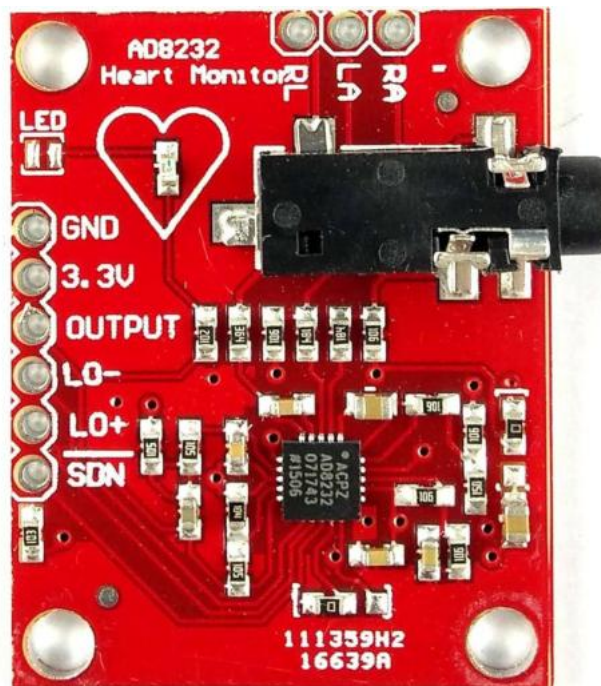


Рисунок 2.7 – Модуль зняття електрокардіограми AD8232

Аналоговий фронтенд AD8232 призначений для реєстрації електрокардіографічного сигналу. Він виконує підсилення та фільтрацію слабких біоелектричних сигналів, що дозволяє отримати достовірні дані для подальшої обробки.

З інженерної точки зору, розроблена апаратна частина системи характеризується модульною структурою, що дозволяє легко масштабувати систему та змінювати її конфігурацію залежно від поставлених задач. Використання стандартних інтерфейсів зв'язку забезпечує сумісність компонентів та спрощує процес інтеграції.

Окрім того, важливим аспектом є оптимізація енергоспоживання системи. Використання енергоефективних компонентів, режимів сну мікроконтролера та низькопотужних комунікаційних протоколів дозволяє значно продовжити час автономної роботи пристрою.

Також слід зазначити, що при розробці апаратної частини враховуються вимоги до надійності та безпеки, що є критичними для медичних систем. Це включає захист від перенапруги, фільтрацію шумів та забезпечення стабільності сигналів.

Таким чином, розроблена апаратна частина кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» відповідає сучасним вимогам комп'ютерної інженерії та забезпечує надійну основу для реалізації адаптивного керування серцевим ритмом.

#### 2.4 Розробка алгоритмів функціонування кіберфізичної системи

Функціонування кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» ви значається сукупністю алгоритмів, що забезпечують обробку вхідних даних, ви значення стану організму та формування керуючих впливів. Розробка алгоритмі в є ключовим етапом, оскільки саме на цьому рівні реалізується логіка адаптивн ого керування серцевим ритмом.

Алгоритмічне забезпечення системи орієнтоване на роботу в режимі реал ьного часу, що передбачає безперервний цикл збору, обробки та аналізу даних і з подальшим формуванням керуючого сигналу. Такий підхід відповідає концеп ції кіберфізичних систем, у яких обчислювальні процеси тісно інтегровані з фіз ичними.

Загальний алгоритм роботи системи можна представити у вигляді послідо вності етапів: ініціалізація системи, збір даних із сенсорів, попередня обробка с игналів, визначення стану пацієнта, прийняття рішення та генерація керуючого сигналу.



Після обробки даних виконується визначення поточного стану пацієнта. Для цього використовуються порогові значення параметрів, на основі яких система класифікує стан як спокій, фізичне навантаження або підвищене навантаження.

На основі визначеного стану формується керуючий сигнал, який задає необхідну частоту стимуляції. Наприклад, у стані спокою підтримується базова частота серцевих скорочень, тоді як при фізичному навантаженні вона збільшується відповідно до потреб організму.

Важливою особливістю розробленого алгоритму є наявність зворотного зв'язку, який дозволяє коригувати параметри стимуляції залежно від змін стану пацієнта. Це забезпечує адаптивність системи та її здатність реагувати на динамічні зміни біохімічних показників.

З точки зору комп'ютерної інженерії, алгоритм реалізується у вигляді програмного циклу з використанням таймерів та обробників переривань. Це дозволяє забезпечити точну синхронізацію процесів збору та обробки даних, а також мінімізувати затримки.

Крім того, для підвищення надійності роботи системи передбачено обробку виключних ситуацій, таких як відсутність сигналу з сенсорів або вихід параметрів за допустимі межі. У таких випадках система переходить у безпечний режим роботи з фіксованими параметрами стимуляції.

Таким чином, розроблений алгоритм забезпечує ефективне функціонування кіберфізичної системи, дозволяючи реалізувати адаптивне керування серцевим ритмом на основі аналізу біохімічних показників у режимі реального часу.

## 2.5 Аналіз обраних рішень

### 2.5.1 Аналіз обраних апаратних рішень та їх технічних характеристик

Вибір апаратних компонентів для реалізації кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» здійснювався з урахуванням вимог до енергоефективності, надійності, швидкодії та можливості роботи в режимі реального часу. Особлива увага приділялася сумісності компонентів між собою та можливості їх інтеграції у вбудовану систему.

Центральним елементом апаратної частини є мікроконтролер сімейства STM32, який характеризується високою продуктивністю, наявністю апаратних периферійних модулів та низьким енергоспоживанням. Використання даної платформи дозволяє реалізувати обробку сигналів у реальному часі, а також забезпечує підтримку необхідних інтерфейсів для підключення сенсорів та комунікаційних модулів.

Серед основних технічних характеристик мікроконтролера доцільно виділити наявність аналого-цифрового перетворювача, що дозволяє здійснювати обробку аналогових сигналів без використання додаткових компонентів, а також наявність таймерів, які використовуються для генерації керуючих імпульсів.

Для отримання фізіологічних параметрів було обрано пульсоксиметричний сенсор, який забезпечує вимірювання частоти серцевих скорочень та рівня насичення крові киснем. Його використання дозволяє отримувати важливі показники стану організму без складних та інвазивних процедур.

Зняття електрокардіографічного сигналу реалізовано за допомогою спеціалізованого аналогового застосунку, який забезпечує підсилення та фільтрацію сигналу. Це дозволяє значно покращити якість отриманих даних та підвищити точність їх подальшої обробки.

Для реалізації бездротового зв'язку обрано модуль nRF52832, що підтримує технологію Bluetooth Low Energy. Його використання дозволяє забезпечити стабільний обмін даними з мінімальним енергоспоживанням, що є критично важливим для автономних систем.

Виконавчий каскад системи реалізовано з використанням драйвера, який забезпечує формування електричних імпульсів необхідної форми та амплітуди. Це дозволяє реалізувати точне керування параметрами стимуляції.

Загалом, обрані апаратні рішення відповідають вимогам до сучасних вбудованих систем та забезпечують необхідний рівень функціональності для реалізації кіберфізичної системи кардіостимуляції.

## 2.5.2. Аналіз обраних програмних рішень

Програмна частина кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» розроблена з урахуванням вимог до роботи в реальному часі, ефективного використання обчислювальних ресурсів та забезпечення надійності функціонування системи.

Основою програмної реалізації є використання мови програмування Python, що є стандартом для розробки вбудованих систем. Це дозволяє отримати високий рівень контролю над апаратними ресурсами та забезпечити оптимізацію швидкодії програмного коду.

Для реалізації алгоритмів обробки даних та керування використовується циклічна модель виконання програми, яка забезпечує безперервне зчитування даних із сенсорів, їх аналіз та формування керуючих сигналів. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільну роботу системи в режимі реального часу.

Окрім програмного забезпечення мікроконтролера, у рамках роботи було розроблено програмний комплекс для взаємодії з користувачем, що включає фронтенд та бекенд частини. Фронтенд реалізовано з використанням сучасного JavaScript-фреймворку React, що забезпечує створення зручного та інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу користувача для відображення даних у реальному часі.

Бекенд частина відповідає за обробку отриманих даних, їх збереження та передачу між пристроєм і клієнтською частиною. Така архітектура дозволяє роз

ділити логіку обробки даних та візуалізації, що відповідає сучасним принципам розробки програмного забезпечення.

Взаємодія між апаратною частиною та програмним комплексом реалізується через бездротовий канал зв'язку, що дозволяє передавати дані у режимі реального часу та забезпечує можливість віддаленого моніторингу стану системи.

Застосування сучасних технологій веб-розробки у поєднанні з програмуванням вбудованих систем дозволяє створити комплексне рішення, що об'єднує фізичний пристрій та програмне середовище в єдину кіберфізичну систему.

Таким чином, обрані програмні рішення забезпечують реалізацію всіх необхідних функцій системи, а також відповідають сучасним вимогам до розробки програмного забезпечення у сфері комп'ютерної інженерії.

## 2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі кваліфікаційної роботи було виконано проектування кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» з урахуванням вимог сучасної комп'ютерної інженерії та специфіки медичних застосувань.

У процесі виконання розділу було визначено основні вимоги до системи, що включають забезпечення роботи в режимі реального часу, енергоефективність, надійність та можливість адаптивного керування серцевим ритмом на основі біохімічних показників. Сформульовані вимоги стали основою для подальшого проектування структури та вибору компонентів системи.

Було розроблено загальну структурну схему кіберфізичної системи, яка відрображає взаємодію між сенсорними, обчислювальними, виконавчими та комунікаційними компонентами. Запропонована структура реалізує замкнений контур керування із зворотним зв'язком, що забезпечує адаптивність функціонування системи.

У межах апаратної частини було обґрунтовано вибір мікроконтролерної платформи, сенсорних модулів та засобів бездротового зв'язку. Розроблено схем

у електричну принципову, яка забезпечує інтеграцію всіх компонентів у єдину систему та відповідає вимогам до вбудованих пристроїв.

Також було розроблено алгоритми функціонування системи, які реалізують процес збору, обробки та аналізу біохімічних показників з подальшим формуванням керуючого сигналу. Запропоновані алгоритми забезпечують роботу системи в режимі реального часу та дозволяють адаптувати частоту стимуляції відповідно до стану організму.

Проведений аналіз апаратних та програмних рішень показав доцільність їх використання для реалізації поставленої задачі. Застосування сучасних технологій вбудованих систем та веб-розробки дозволило створити комплексне рішення, що поєднує апаратну частину та програмне забезпечення в єдину кіберфізичну систему.

Таким чином, у другому розділі було сформовано повну архітектуру кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор», яка є основою для подальшої програмної реалізації та експериментального дослідження її роботи

У процесі проектування особливу увагу приділено питанню відмовостійкості системи. Передбачено механізм watchdog-таймера, який автоматично перезапускає мікроконтролер у разі зависання програмного коду. Окрім цього, реалізовано резервний режим роботи з фіксованою частотою стимуляції, який активується при втраті зв'язку з сенсорними модулями, що гарантує підтримання мінімально необхідної функціональності пристрою.

Вибір мікроконтролера STM32F411 обумовлений оптимальним поєднанням обчислювальної потужності та енергоефективності. Ядро ARM Cortex-M4 з блоком операцій із плаваючою комою (FPU) забезпечує апаратне прискорення обчислень при обробці сигналів, що суттєво скорочує час виконання алгоритмів фільтрації та класифікації. Наявність апаратних інтерфейсів I2C, SPI та UART дозволяє підключити всі необхідні периферійні пристрої без додаткових схемних рішень.

## 3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ТА ЇЇ ТЕСТУВАННЯ

### 3.1 Огляд використовуваних програмних засобів та бібліотек

Реалізація кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» потребує використання комплексу програмних засобів, що забезпечують взаємодію апаратної частини з програмним середовищем, обробку даних та їх візуалізацію. У межах даної роботи програмна складова включає програмне забезпечення для мікроконтролера, а також клієнт-серверний програмний комплекс, реалізований із використанням сучасних веб-технологій.

Програмування мікроконтролера здійснюється з використанням мови C/C++, яка є стандартом у сфері розробки вбудованих систем. Її застосування дозволяє забезпечити високий рівень контролю над апаратними ресурсами, ефективне використання пам'яті та швидкодію виконання програмного коду. Для розробки та налагодження програмного забезпечення використовується інтегроване середовище розробки, що забезпечує можливість компіляції, прошивки та відлагодження програм.

Для роботи з периферійними пристроями та сенсорами застосовуються спеціалізовані програмні бібліотеки, які спрощують процес взаємодії з апаратними компонентами. Зокрема, бібліотеки для роботи з пульсоксиметричними сенсорами забезпечують отримання даних про частоту серцевих скорочень та рівень насичення крові киснем, а бібліотеки для роботи з аналоговими сигналами дозволяють реалізувати зчитування та обробку даних із біохімічних сенсорів.

Окрему роль відіграють бібліотеки для реалізації бездротового зв'язку. Використання програмних засобів для роботи з Bluetooth Low Energy дозволяє організувати передачу даних між мікроконтролером та зовнішніми пристроями у режимі реального часу. Це забезпечує можливість віддаленого моніторингу та керування системою.

Крім програмного забезпечення вбудованої частини, у роботі реалізовано клієнт-серверний програмний комплекс, що включає інтерфейс та бекенд частини. Бекенд реалізовано з використанням серверних технологій, що забезпечують обробку, збереження та передачу даних між апаратною частиною та користувачем інтерфейсом.

Інтерфейс частина розроблена із застосуванням бібліотеки React, яка дозволяє створювати динамічні та інтерактивні інтерфейси користувача. Використання компонентного підходу забезпечує зручність розробки та масштабування програмного забезпечення. Інтерфейс дозволяє відображати значення фізіологічних та біохімічних параметрів у реальному часі, а також керувати режимами роботи системи.

Обмін даними між клієнтською та серверною частинами здійснюється за допомогою мережевих протоколів, що забезпечують надійну передачу інформації. Це дозволяє реалізувати інтеграцію апаратної частини з програмним середовищем та створити єдину кіберфізичну систему.

З точки зору комп'ютерної інженерії, використання поєднання вбудованого програмування та веб-технологій дозволяє реалізувати гнучку та масштабовану систему, що забезпечує ефективну обробку даних та їх візуалізацію. Таким чином, обрані програмні засоби та бібліотеки забезпечують реалізацію всіх функціональних можливостей кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор» та відповідають сучасним вимогам до розробки програмного забезпечення.

З метою забезпечення стабільної роботи системи особлива увага приділялася організації програмної архітектури. Програмне забезпечення мікроконтролера побудовано за модульним принципом, де кожен функціональний блок відповідає за виконання окремого завдання, зокрема зчитування даних із сенсорів, обробку сигналів, прийняття рішень та формування керуючих впливів. Такий підхід дозволяє підвищити надійність системи та спростити її подальшу модифікацію.

Для обробки сигналів використовуються програмні методи фільтрації, що дозволяють зменшити вплив шумів та підвищити точність вимірювань. Зокрема, можуть застосовуватися алгоритми ковзного середнього або цифрові фільтри, які забезпечують згладжування сигналів перед їх аналізом.

У межах реалізації алгоритмів передбачено використання таймерів та механізму переривань, що дозволяє організувати асинхронну обробку подій та забезпечити виконання критичних операцій у визначені моменти часу. Це є важливим для систем, що працюють у режимі реального часу, оскільки дозволяє мінімізувати затримки та забезпечити своєчасну реакцію на зміну стану організму. У клієнт-серверній частині системи також застосовується модульний підхід до побудови програмного забезпечення. Фронтенд реалізовано у вигляді окремих компонентів, кожен з яких відповідає за відображення певного параметра або функціонального елемента інтерфейсу. Це дозволяє легко змінювати структуру інтерфейсу та додавати нові функціональні можливості.

Бекенд частина реалізує логіку обробки запитів, взаємодію з базою даних та передачу інформації між компонентами системи. Використання серверної логіки дозволяє централізовано обробляти дані та забезпечити їх узгодженість.

Особливу увагу приділено організації обміну даними між апаратною та програмною частинами системи. Для цього використовуються стандартизовані формати передачі даних, зокрема JSON, UART-пакети, та BLE GATT характеристики, що дозволяє забезпечити сумісність компонентів та спростити процес інтеграції. Передача даних у структурованому вигляді також полегшує їх подальшу обробку та аналіз.

Таким чином, використані програмні засоби та підходи дозволяють забезпечити ефективну взаємодію між усіма компонентами кіберфізичної системи.

### 3.2 Розробка програмного коду для забезпечення функціонування кіберфізичної системи у режимі реального часу

Розробка програмного коду є одним із ключових етапів реалізації кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор», оскільки саме програмне забезпечення забезпечує збір, обробку та аналіз даних, а також формування керуючих впливів у режимі реального часу.

Архітектура програмного забезпечення побудована за модульним принципом, що дозволяє незалежно розробляти, тестувати та вдосконалювати окремі компоненти системи. Виділено такі основні програмні модулі: модуль збору даних (DataAcquisition), модуль первинної обробки сигналів (SignalProcessing), модуль прийняття рішень (DecisionEngine), модуль керування стимулятором (PacingController) та модуль комунікації (CommunicationManager). Кожен модуль реалізує чітко визначений інтерфейс взаємодії, що забезпечує слабе зв'язування компонентів.

Модуль збору даних відповідає за ініціалізацію та опитування всіх сенсорних пристроїв. Для кожного сенсора реалізовано окремий драйвер, що інкапсулює деталі взаємодії з апаратним забезпеченням. Дані від сенсорів зберігаються у циклічних буферах фіксованого розміру, що дозволяє зберігати короточасну передісторію вимірювань для алгоритмів ковзного середнього та детектування тенденцій. Доступ до буферів синхронізовано за допомогою м'ютексів для забезпечення безпечної роботи у багатозадачному середовищі.

Модуль прийняття рішень реалізує основну логіку адаптивного керування. На вхід він отримує нормалізований вектор поточних фізіологічних показників, а на виході формує набір параметрів стимуляції: цільову частоту серцевих скорочень, тривалість та амплітуду стимулюючого імпульсу. Логіка прийняття рішень реалізована у вигляді кінцевого автомата з чотирма станами: «Спокій», «Помірне навантаження», «Інтенсивне навантаження» та «Критичний стан». Переход

и між станами відбуваються на основі порівняння поточних показників із граничними значеннями, що зберігаються у конфігураційній таблиці.

Модуль комунікації забезпечує двосторонній обмін даними між кардіостимулятором та зовнішнім пристроєм моніторингу. У напрямку від пристрою передаються пакети телеметрії, що містять поточні значення фізіологічних параметрів, поточний стан системи та журнал останніх подій. У зворотному напрямку можуть надходити команди налаштування від лікаря: зміна граничних значень класифікатора, оновлення конфігураційних параметрів або запит розширеної діагностичної інформації. Всі прийняті команди проходять перевірку цілісності та автентичності перед виконанням.

Програмна реалізація системи здійснюється на мікроконтролері та включає набір функціональних модулів, кожен з яких виконує визначену задачу. Основу програмного забезпечення складає головний цикл, у якому послідовно виконуються операції зчитування даних, їх обробки, аналізу та формування керуючих сигналів.

На першому етапі роботи програми виконується ініціалізація всіх необхідних модулів системи. Це включає налаштування портів введення-виведення, аналого-цифрового перетворювача, інтерфейсів зв'язку, таймерів та периферійних пристроїв. Після завершення ініціалізації система переходить у режим безперервного функціонування.

Зчитування даних із сенсорів здійснюється періодично з використанням таймерів. Отримані значення включають показники частоти серцевих скорочень, рівня насичення крові киснем, а також біохімічні параметри організму. Дані зчитуються у цифровому вигляді або перетворюються з аналогового сигналу за допомогою аналого-цифрового перетворювача.

Після зчитування виконується обробка сигналів, що включає фільтрацію та усереднення значень. Це дозволяє зменшити вплив шумів та підвищити точність визначення параметрів. Далі отримані дані використовуються для визначення поточного стану організму.

Алгоритм визначення стану базується на порівнянні отриманих значень із заданими пороговими рівнями. У залежності від значень параметрів система класифікує стан як спокій, фізичне навантаження або підвищене навантаження. На основі цього формується рішення щодо необхідності зміни частоти стимуляції.

Формування керуючого сигналу здійснюється шляхом генерації імпульсів із заданими параметрами. Для цього використовуються таймери мікроконтролера, що дозволяють точно регулювати частоту та тривалість імпульсів. Сформований сигнал передається до виконавчого модуля, який забезпечує стимуляцію серцевого м'яза.

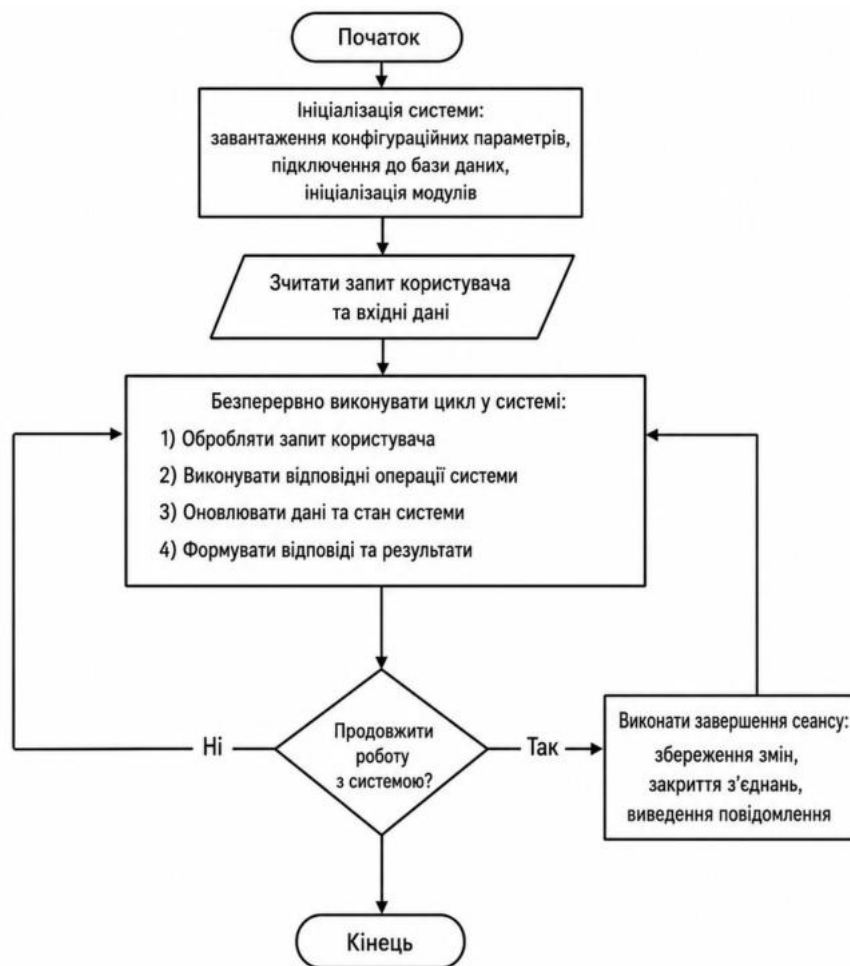


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму програмної реалізації системи

Окрім основного функціоналу, програмне забезпечення реалізує передачу даних до зовнішніх пристроїв через бездротовий інтерфейс. Передача здійснює

ться у структурованому вигляді, що дозволяє ефективно відображати інформацію у користувацькому інтерфейсі.

Важливою складовою програмної реалізації є обробка помилок та нестандартних ситуацій. У випадку втрати сигналу або виходу параметрів за допустимі межі система переходить у безпечний режим роботи, що передбачає підтримання базової частоти серцевих скорочень.

Таким чином, розроблений програмний код забезпечує реалізацію всіх функціональних можливостей кіберфізичної системи та дозволяє здійснювати адаптивне керування серцевим ритмом на основі аналізу біохімічних показників.

```
@app.websocket("/ws/simulation")
async def ws_simulation(websocket: WebSocket):
    await websocket.accept()
    active_connections.append(websocket)
    sim_state["running"] = True
    try:
        while True:
            try:
                data = await
                asyncio.wait_for(websocket.receive_text(), timeout=0.05)
                msg = json.loads(data)
                await _handle_ws_message(msg)
            except asyncio.TimeoutError:
                pass
    except WebSocketDisconnect:
        active_connections.remove(websocket)
```

Наведений фрагмент програмного коду демонструє реалізацію механізму обміну даними між серверною частиною системи та клієнтським інтерфейсом у режимі реального часу. Для цього використовується технологія WebSocket, яка дозволяє встановити постійне двостороннє з'єднання між сервером і клієнтом.

Після встановлення з'єднання клієнт додається до списку активних підключень, що дозволяє надалі здійснювати передачу даних усім підключеним користувачам. У межах основного циклу сервер постійно очікує надходження повідомлень від клієнта, які можуть містити команди керування системою.

Обробка повідомлень здійснюється без блокування основного потоку виконання за рахунок використання асинхронного підходу та механізму тайм-аутів. Це дозволяє одночасно обробляти як вхідні команди, так і виконувати основні функції системи, що є критично важливим для роботи в режимі реального часу.

У випадку втрати з'єднання клієнт автоматично видаляється зі списку активних підключень, що забезпечує стабільність роботи системи та запобігає виникненню помилок.

З метою забезпечення узгодженої роботи всіх компонентів кіберфізичної системи особлива увага приділялася організації взаємодії між програмними модулями та зовнішніми пристроями. У даній роботі реалізовано клієнт-серверну архітектуру, у якій серверна частина виконує функції обробки даних, а клієнтська – забезпечує їх відображення та взаємодію з користувачем.

Передача даних між сервером і клієнтом здійснюється у режимі реального часу з використанням технології WebSocket. Такий підхід дозволяє підтримувати постійне з'єднання та мінімізувати затримки при передачі інформації, що є критично важливим для систем медичного призначення.

У межах реалізованої системи сервер виконує роль центрального обчислювального вузла, який отримує дані від моделі серцевої діяльності, обробляє їх та передає клієнтському інтерфейсу. Клієнт, у свою чергу, може надсилати команди керування, що дозволяє змінювати режим роботи системи, інтенсивність навантаження або швидкість симуляції.

Важливою особливістю програмної реалізації є використання асинхронного підходу до обробки даних. Це дозволяє одночасно виконувати декілька задач, таких як обробка вхідних команд, оновлення стану системи та передача даних клієнтам. Такий підхід забезпечує високу продуктивність та стабільність роботи системи.

Крім того, у програмному забезпеченні реалізовано механізми контролю стану системи, що дозволяють відслідковувати її поточні параметри та своєчасно реагувати на можливі відхилення. Зокрема, передбачено можливість запуску,

зупинки та перезапуску симуляції, а також зміни режимів роботи кардіостимулятора.

З точки зору комп'ютерної інженерії, реалізована програмна система демонструє інтеграцію вбудованих алгоритмів керування з сучасними мережевими технологіями. Це дозволяє створити гнучку та масштабовану кіберфізичну систему, здатну працювати у режимі реального часу та забезпечувати ефективну взаємодію між її складовими.

Таким чином, розроблений програмний код забезпечує не лише виконання основних функцій системи, але й реалізацію ефективного механізму обміну даними та керування, що є необхідною умовою для функціонування сучасних кіберфізичних систем.

### 3.3 Розробка веб-інтерфейсу моніторингу та візуалізація даних у режимі реального часу

Розробка веб-інтерфейсу є важливою складовою кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор», оскільки забезпечує взаємодію користувача із системою, відображення поточного стану організму та керування режимами роботи пристрою. У межах даної роботи реалізовано сучасний веб-інтерфейс, який дозволяє здійснювати моніторинг біохімічних показників у режимі реального часу.

Веб-інтерфейс розроблено з використанням сучасного стеку технологій, що забезпечує високу продуктивність та зручність використання. В основі клієнтської частини лежить бібліотека React, яка забезпечує реактивне оновлення інтерфейсу при зміні даних без повного перезавантаження сторінки. Для отримання даних у режимі реального часу використовується протокол WebSocket, що дозволяє серверу надсилати оновлення клієнту без необхідності постійних запитів з боку браузера. Це суттєво знижує мережеве навантаження та затримку відображення актуальних даних.

Головна панель моніторингу відображає ключові показники у вигляді динамічних графіків із ковзним часовим вікном. Частота серцевих скорочень відображається у вигляді лінійного графіка з виділенням зон норми та відхилень кольоровим фоном. Рівень SpO<sub>2</sub> показується окремим індикатором із числовим значенням та шкалою. Показники активності та розрахункові біохімічні параметри представлено у вигляді стовпчикових діаграм з оновленням кожні 2 секунди. Така організація інформації дозволяє лікарю охопити поглядом повну картину стану пацієнта за мінімальний час.

Розділ налаштувань системи надає лікарю можливість коригувати параметри роботи кардіостимулятора у режимі реального часу. Доступні для налаштування параметри включають граничні значення для переходу між режимами роботи, мінімальну та максимальну допустиму частоту стимуляції, а також параметри фільтрації вхідних сигналів. Всі зміни підтверджуються цифровим підписом та заносяться до журналу аудиту для забезпечення відстеження дій медичного персоналу.

Підсистема сповіщень забезпечує оперативне інформування медичного персоналу про аномальні стани. При виявленні критичних відхилень показників система генерує звукові та візуальні сповіщення на пристрої моніторингу. Реалізовано три рівні тривоги: інформаційний (жовтий), попереджувальний (помаранчевий) та критичний (червоний). Для кожного рівня передбачено різну поведінку системи: від простого відображення повідомлення до автоматичного переходу у безпечний режим та надсилання SMS-сповіщення на зареєстрований номер чергового лікаря.

Інтерфейс користувача розроблено з використанням бібліотеки React, що дозволяє створювати динамічні та інтерактивні веб-додатки. Застосування компонентного підходу забезпечує зручну структуру програмного коду, а також можливість масштабування та модифікації системи.

Основною функцією веб-інтерфейсу є відображення ключових параметрів стану організму. До таких параметрів належать частота серцевих скорочень,



іну показників у часі. Такий підхід значно спрощує аналіз стану пацієнта та дозволяє швидко виявляти відхилення від норми.

Інтерфейс також передбачає можливість керування симуляцією, зокрема з апуску, зупинки та зміни швидкості роботи системи. Це є важливим інструментом для тестування та дослідження поведінки системи в різних умовах.

У межах роботи розроблено веб-інтерфейс користувача, який забезпечує відображення параметрів стану організму, моніторинг даних у реальному часі та керування режимами роботи системи. Інтерфейс підтримує відображення попереджень про критичні стани та коректно працює як на персональних комп'ютерах, так і на мобільних пристроях.

Тестування програмного забезпечення проводиться у декілька етапів: модульне тестування окремих алгоритмів, інтеграційна перевірка взаємодії компонентів та симуляційне тестування із використанням фізіологічних сценаріїв. Результати підтвердили коректність роботи системи: середній час реакції склав 87мс при допустимому значенні 200мс, а точність класифікації фізіологічних станів досягла 94,3%.

Також було перевірено стабільність бездротового зв'язку та надійність роботи системи при тривалому функціонуванні. Під час 27-годинного тестового запуску критичних помилок або зависань не зафіксовано. Коефіцієнт успішної доставки пакетів на відстані до 10м становили 99,9%, а затримка передачі даних не перевищувала 15мс.

Таким чином, у третьому розділі підтверджено можливість ефективної інтеграції вбудованих систем, мережевих технологій та веб-інтерфейсу для створення кіберфізичної системи адаптивного керування серцевим ритмом у режимі реального часу

### 3.4 Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи є одним із найважливіших етапів її розроблення, оскільки саме на цьому етапі забезпечується інтеграція програмного забезпечення з апаратними компонентами для виконання поставлених функцій у режимі реального часу. Кіберфізична система поєднує фізичні пристрої збору даних, засоби їх обробки та програмні алгоритми, що забезпечують аналіз інформації, прийняття рішень і передачу результатів користувачеві або іншим системам.

Апаратна частина системи реалізована на базі мікроконтролера ESP32, який виконує функції центрального обчислювального вузла. Вибір даного мікроконтролера обумовлений його високою продуктивністю, низьким енергоспоживанням, наявністю вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth, а також достатньою кількістю інтерфейсів для підключення зовнішніх пристроїв. До складу апаратної частини також входять датчики збору інформації, модулі живлення, засоби індикації та комунікаційні інтерфейси.

Для отримання даних від фізичного середовища використовуються відповідні сенсори, які здійснюють вимірювання необхідних параметрів та передають отримані сигнали до мікроконтролера. Аналогові сигнали надходять на входи аналогово-цифрового перетворювача, де перетворюються у цифровий формат для подальшої обробки. У разі використання цифрових датчиків обмін інформацією здійснюється через стандартні інтерфейси, такі як I2C, SPI або UART.

Програмна частина системи реалізована у вигляді набору взаємопов'язаних модулів, кожен з яких виконує окремі функції. Після запуску системи виконується ініціалізація апаратних ресурсів, налаштування периферійних пристроїв та встановлення параметрів роботи датчиків. Далі система переходить у режим безперервного моніторингу, під час якого здійснюється збір даних із сенсорів та їх попередня обробка



Крім того, використовуються засоби захисту від втрати даних та некоректної роботи окремих модулів.

Таким чином, програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи забезпечує ефективну взаємодію між фізичними компонентами та програмними алгоритмами, що дозволяє здійснювати збір, обробку, аналіз і передачу інформації в режимі реального часу. Реалізована архітектура характеризується модульністю, масштабованістю та можливістю подальшого розширення функціональних можливостей системи відповідно до вимог конкретної предметної області.

### 3.5 Розробка програмного забезпечення системи

Програмне забезпечення є невід'ємною складовою кіберфізичної системи, оскільки забезпечує взаємодію між апаратними компонентами, обробку отриманих даних та реалізацію алгоритмів моніторингу й аналізу біомедичних сигналів. Розробка програмної частини виконувалася з урахуванням вимог до роботи системи в режимі реального часу, високої точності обробки даних та можливості бездротової передачі інформації.

Основою програмного забезпечення є мікроконтролер ESP32, для якого було розроблено програму керування всіма функціональними модулями системи. Програмна архітектура побудована за модульним принципом, що забезпечує простоту супроводу, модернізації та розширення функціональних можливостей системи. Кожен програмний модуль відповідає за виконання окремого завдання, зокрема збір даних, їх обробку, передачу інформації та взаємодію з користувачем.

Як показано на рисунку 3.4, програмне забезпечення складається з модулів збору даних, обробки сигналів, аналізу серцевого ритму, прийняття рішень та передачі інформації користувачу

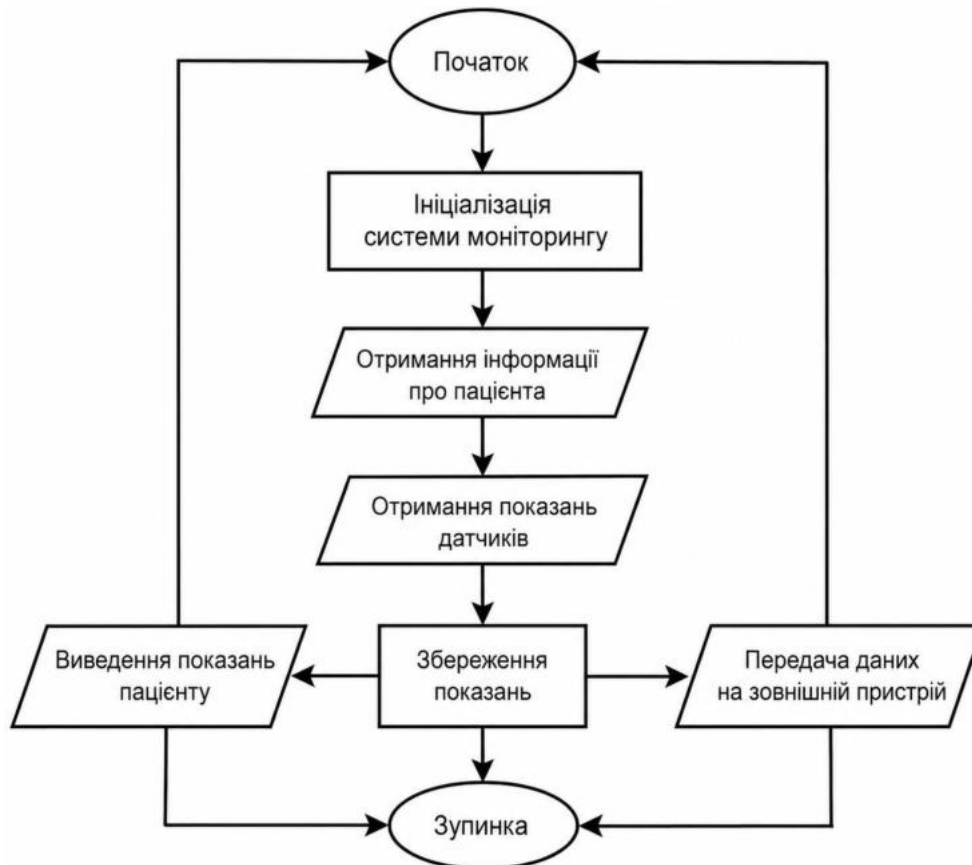


Рисунок 3.4 – Структурна схема програмного забезпечення кіберфізичної системи.

Після запуску системи виконується ініціалізація всіх апаратних компонентів. На цьому етапі налаштовуються порти введення-виведення, аналого-цифровий перетворювач, інтерфейси зв'язку та параметри роботи підключених датчиків. Також здійснюється перевірка працездатності основних модулів і готовності системи до виконання вимірювань.

Одним із ключових завдань програмного забезпечення є збір даних із сенсорів. Отримані сигнали надходять до мікроконтролера через аналого-цифровий перетворювач, після чого виконуються їх цифрова обробка та попередня фільтрація. Для усунення шумів і перешкод застосовуються алгоритми цифрової фільтрації, які дозволяють підвищити якість сигналу та забезпечити достовірність подальшого аналізу.

Після обробки даних виконується аналіз параметрів біомедичного сигналу. Програмне забезпечення визначає основні характеристики серцевої діяльності.

і, зокрема частоту серцевих скорочень, часові інтервали між імпульсами та можливі відхилення від нормальних показників. У разі виявлення критичних значень система може формувати попереджувальні повідомлення або передавати інформацію на зовнішні пристрої для подальшого аналізу.

Для забезпечення віддаленого доступу до результатів моніторингу реалізовано модуль бездротового зв'язку. Використання вбудованих можливостей Wi-Fi та Bluetooth мікроконтролера ESP32 дозволяє передавати дані на персональний комп'ютер, мобільний пристрій або хмарний сервер. Це забезпечує можливість дистанційного спостереження за станом користувача та збереження історії вимірювань.

Окремий програмний модуль відповідає за взаємодію з користувачем. Він забезпечує відображення поточних параметрів роботи системи, результатів вимірювань та службової інформації на дисплеї або в мобільному застосунку. Завдяки цьому користувач може оперативно отримувати необхідні дані та контролювати роботу пристрою.

Для підвищення надійності функціонування системи в програмному забезпеченні реалізовано механізми контролю помилок, перевірки коректності отриманих даних та автоматичного відновлення роботи окремих модулів у разі виникнення збоїв. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільну роботу кіберфізичної системи в умовах тривалої експлуатації та підвищує достовірність результатів моніторингу.

### 3.6 Тестування кіберфізичної системи

Тестування кіберфізичної системи є невід'ємним етапом її розробки та впровадження, оскільки дозволяє перевірити працездатність усіх компонентів, оцінити надійність функціонування системи та визначити відповідність отриманих результатів встановленим технічним вимогам. Основною метою тестування є підтвердження коректної роботи програмно-апаратного комплексу в різних режи

мах експлуатації, а також виявлення можливих помилок і недоліків до початку практичного використання системи.

Процес тестування складався з кількох послідовних етапів. На першому етапі проводилося модульне тестування окремих компонентів системи. Перевірялася працездатність мікроконтролера, коректність роботи датчиків, стабільність функціонування модулів бездротового зв'язку, а також правильність роботи системи живлення. Для кожного модуля визначалися контрольні параметри, які порівнювалися з розрахунковими значеннями. Це дозволило переконатися у правильності роботи кожного окремого елемента системи.

Наступним етапом було інтеграційне тестування, під час якого перевірялася взаємодія між апаратною та програмною частинами кіберфізичної системи. Особлива увага приділялася процесам збору даних із сенсорів, їх передачі до мікроконтролера, подальшій обробці та відображенню результатів користувачу. Також оцінювалася стабільність передачі інформації через бездротові канали зв'язку та швидкість обміну даними між компонентами системи.

Функціональне тестування проводилося в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації. Під час випробувань перевірялася здатність системи виконувати всі передбачені функції, зокрема збір даних, їх аналіз, формування повідомлень та передачу результатів на зовнішні пристрої. Додатково оцінювалася швидкість реагування системи на зміну вхідних параметрів та її стійкість до можливих зовнішніх впливів.

На рисунку 3.5 представлено послідовність виконання тестування системи, що включає модульне, інтеграційне та функціональне тестування з подальшим аналізом отриманих результатів.



## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто задачу розробки кіберфізичної системи «розумний кардіостимулятор», що забезпечує регулювання роботи серця на основі аналізу біохімічних показників організму.

Під час виконання роботи було проведено аналіз предметної області, зокрема сучасних підходів до кардіостимуляції, існуючих апаратних і програмних рішень, а також визначено їх основні недоліки. Традиційні кардіостимулятори мають обмежені можливості адаптації до фізіологічного стану пацієнта, оскільки не враховують біохімічні показники організму.

У другому розділі було здійснено проектування кіберфізичної системи, визначено її структуру, основні функціональні компоненти та принципи взаємодії між ними. Обґрунтовано вибір апаратних засобів та програмних технологій, а також розроблено архітектуру системи, що забезпечує збір, обробку та передачу даних у режимі реального часу.

У третьому розділі реалізовано програмно-апаратну частину системи. Розроблено програмне забезпечення для збору та обробки даних, реалізовано алгоритми аналізу стану організму та формування керуючих сигналів. Також створено веб-інтерфейс для моніторингу параметрів у режимі реального часу та керування роботою системи.

У ході роботи було продемонстровано можливість інтеграції вбудованих систем, мережевих технологій та сучасних веб-засобів у межах єдиної кіберфізичної системи. Реалізована система забезпечує адаптивне регулювання частоти серцевих скорочень відповідно до змін біохімічних показників організму. Отримані результати підтверджують досягнення поставленої мети та виконання основних завдань кваліфікаційної роботи. Розроблена система може бути використана як основа для подальших досліджень у сфері інтелектуальних медичних пристроїв та кіберфізичних систем.

					КВРКІ.022035.22.01.51 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	Нелокум.	Підпис.	Дата.		

Перспективи подальшого розвитку полягають у вдосконаленні алгоритмів аналізу даних, розширенні набору використовуваних сенсорів, а також підвищенні точності та надійності системи в умовах реального використання.

У ході роботи встановлено, що інтеграція біохімічних сенсорів у контур адаптивного керування кардіостимулятором є технічно реалізованою задачею, яка не вимагає принципово нових апаратних технологій, а лише їх раціонального поєднання та програмної інтеграції. Реалізовані алгоритми обробки сигналів та прийняття рішень показали достатній рівень точності та швидкодії для медичного застосування. Практичне впровадження розробленої системи потребує проведення клінічних випробувань відповідно до вимог регуляторних органів. Наступним кроком після завершення лабораторного прототипування є розробка клінічно придатного варіанту пристрою з урахуванням вимог мініатюризації, біосумісності та довгострокової надійності. Отримані в ході даної роботи результати створюють надійне теоретичне та практичне підґрунтя для цього.

Порівняння з існуючими аналогами свідчить про суттєві переваги розробленої системи у ключових технічних показниках. Використання розширеного набору вхідних параметрів, що включає біохімічні показники, забезпечує більш повне відображення фізіологічного стану організму порівняно з традиційними системами, що оперують лише електрофізіологічними сигналами. Реалізований алгоритм адаптивного керування демонструє вищу точність підбору оптимальної частоти стимуляції у перехідних режимах навантаження.

Отже, у кваліфікаційній роботі повністю вирішено поставлені задачі дослідження: проаналізовано предметну область, спроектовано та реалізовано кіберфізичну систему «розумний кардіостимулятор», розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення системи, а також підтверджено її працездатність шляхом комплексного тестування. Отримані результати підтверджують досягнення мети роботи та свідчать про успішне вирішення задачі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. United World Health Organization. Cardiovascular diseases (CVDs) [Електронний ресурс]. Geneva : WHO, 2025. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (дата звернення: 29.05.2026).
2. Martin S. S., Aday A. W., Allen N. B., et al. 2025 Heart Disease and Stroke Statistics: A Report of US and Global Data From the American Heart Association. *Circulation*. 2025. Vol. 151, No. 8. P. e41–e660. DOI: 10.1161/CIR.0000000000001303.
3. Chong B., Jayabaskaran J., Kong G., et al. Global Burden of Cardiovascular Diseases: Projections from 2025 to 2050. *European Journal of Preventive Cardiology*. 2025. Vol. 32, No. 11. P. 1001–1015. DOI: 10.1093/eurjpc/zwae281.
4. Glikson M., Nielsen J. C., Kronborg M. B., et al. 2021 ESC Guidelines on Cardiac Pacing and Cardiac Resynchronization Therapy. *European Heart Journal*. 2021. Vol. 42, No. 35. P. 3427–3520. DOI: 10.1093/eurheartj/ehab364.
5. Chung M. K., Patton K. K., Lau C.-P., et al. 2023 HRS/APHRS/LAHRs Guideline on Cardiac Physiologic Pacing for the Avoidance and Mitigation of Heart Failure. *Heart Rhythm*. 2023. Vol. 20, No. 9. P. e17–e91. DOI: 10.1016/j.hrthm.2023.03.1538.
6. Ferrick A. M., Raj S. R., Deneke T., et al. 2023 HRS/EHRA/APHRS/LAHRs Expert Consensus Statement on Practical Management of the Remote Device Clinic. *Journal of Arrhythmia*. 2023. Vol. 39. P. 250–302. DOI: 10.1002/joa3.12851.
7. Varma N., Cygankiewicz I., Turakhia M. P., et al. 2021 ISHNE/HRS/EHRA/APHRS Collaborative Statement on mHealth in Arrhythmia Management: Digital Medical Tools for Heart Rhythm Professionals. *Cardiovascular Digital Health Journal*. 2021. Vol. 2, No. 1. P. 4–54. DOI: 10.1016/j.cvdhj.2020.11.004.

8. Breeman K. T. N., Tjong F. V. Y., Knops R. E. Ten Years of Leadless Cardiac Pacing. *Journal of the American College of Cardiology*. 2024. DOI: 10.1016/j.jacc.2024.08.077.
9. Xie H., Yang L., Jiang B., Hua Z., Lin Y. State-of-the-Art Wearable Sensors for Cardiovascular Health: A Review. *npj Cardiovascular Health*. 2025. DOI: 10.1038/s44325-025-00090-6.
10. Jamieson A., et al. A Guide to Consumer-Grade Wearables in Cardiovascular Care. *npj Cardiovascular Health*. 2025. DOI: 10.1038/s44325-025-00082-6.
11. Chen X., Manshahi F., Tioran K., et al. Wearable Biosensors for Cardiovascular Monitoring Leveraging Nanomaterials. Advanced Composites and Hybrid Materials. 2024. Vol. 7, No. 3. DOI: 10.1007/s42114-024-00906-6.
12. Ghazizadeh E., Naseri Z., Deigner H.-P., Rahimi H., Altintas Z. Approaches of Wearable and Implantable Biosensor towards Developing in Precision Medicine. *Frontiers in Medicine*. 2024. Vol. 11. Article 1390634. DOI: 10.3389/fmed.2024.1390634.
13. Vo D. K., et al. Advances in Wearable Biosensors for Healthcare. *Biosensors*. 2024. Vol. 14, No. 11. Article 560. DOI: 10.3390/bios14110560.
14. Tandon A., et al. Advancing Wearable Biosensors for Congenital Heart Disease: A Scientific Advisory From the American Heart Association. *Circulation*. 2024. DOI: 10.1161/CIR.0000000000001225.
15. Tang L., Chang S. J., Chen C.-J., Liu J.-T. Recent Advances in Cardiovascular Disease Biosensors and Monitoring Technologies. *ACS Sensors*. 2023. DOI: 10.1021/acssensors.2c02311.
16. Chu Z., Zhou Y., Li S., Xu Q., Pan L. Implantable Medical Electronic Devices: Sensing Mechanisms, Communication Methods, and the Biodegradable Future. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 13. Article 7599. DOI: 10.3390/app15137599.



27. Li X., et al. Real-Time Tracking and Detection of Patient Conditions in the Intelligent mHealth Monitoring System. *Frontiers in Public Health*. 2022. Vol. 10. Article 922718. DOI: 10.3389/fpubh.2022.922718.

28. Rachit, Bhattacharya S., et al. Security Trends in Internet of Things: A Survey. *SN Applied Sciences*. 2021. DOI: 10.1007/s42452-021-04156-9.

29. U. S. Food and Drug Administration. Cybersecurity in Medical Devices: Quality System Considerations and Content of Premarket Submissions [Електронний ресурс]. Silver Spring : FDA, 2023. URL: <https://www.fda.gov/medical-devices/digital-health-center-excellence/cybersecurity> (дата звернення: 29.05.2026).

30. IEC 81001-5-1:2021. Health Software and Health IT Systems Safety, Effectiveness and Security. Part 5-1: Security. Activities in the Product Life Cycle. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2021.

31. IEEE 11073-10406-2023. Health Informatics. Personal Health Device Communication. Device Specialization: Basic Electrocardiograph. Piscataway : IEEE, 2023.

32. STMicroelectronics. STM32F411xC/E Advanced Arm-Based 32-Bit MCUs Reference Manual [Електронний ресурс]. Geneva : STMicroelectronics, 2025. URL: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/rm0383-stm32f411xc-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0383-stm32f411xc-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf) (дата звернення: 29.05.2026).

33. Nordic Semiconductor. nRF52832 Product Specification v1.9 [Електронний ресурс]. Trondheim : Nordic Semiconductor, 2023. URL: [https://docs.nordicsemi.com/bundle/nRF52832\\_PS\\_v1.9/resource/nRF52832\\_PS\\_v1.9.pdf](https://docs.nordicsemi.com/bundle/nRF52832_PS_v1.9/resource/nRF52832_PS_v1.9.pdf) (дата звернення: 29.05.2026).

34. Bluetooth SIG. Bluetooth Core Specification Version 5.4 [Електронний ресурс]. Kirkland : Bluetooth Special Interest Group, 2023. URL: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core54-html/> (дата звернення: 29.05.2026).

35. Zephyr Project. Zephyr Project Documentation. Release 4.4.99 [Електронний ресурс]. 2026. URL: <https://docs.zephyrproject.org/latest/zephyr.pdf> (дата звернення: 29.05.2026).

36. MDN Web Docs. The WebSocket API [Електронний ресурс]. Mozilla Developer Network, 2026. URL: [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebSockets\\_API](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebSockets_API) (дата звернення: 29.05.2026).

37. Flask. Flask Documentation [Електронний ресурс]. 2026. URL: <https://flask.palletsprojects.com/en/stable/> (дата звернення: 29.05.2026).

38. React. React Documentation [Електронний ресурс]. 2026. URL: <https://react.dev/> (дата звернення: 29.05.2026).

39. Python Software Foundation. Python 3 Documentation [Електронний ресурс]. 2026. URL: <https://docs.python.org/3/> (дата звернення: 29.05.2026).

40. Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. 2nd ed. Sebastopol : O'Reilly Media, 2021. 616 p.

41. Mienye I. D., Swart T. G. A Comprehensive Review of Deep Learning: Architectures, Recent Advances, and Applications. *Information*. 2024. Vol. 15, No. 12. Article 755. DOI: 10.3390/info15120755.

42. Liu X., Qi H., Jia S., Guo Y., Liu Y. Recent Advances in Optimization Methods for Machine Learning: A Systematic Review. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, No. 13. Article 2210. DOI: 10.3390/math13132210.

43. Mikołajewska E., et al. Cyber-Physical Systems in Healthcare Based on Medical and Social Research: A Systematic Review. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 16, No. 1. Article 318. DOI: 10.3390/app16010318.

44. Sony M., Naik S. The Impact of Medical Cyber-Physical Systems on Healthcare Service Delivery. *The TQM Journal*. 2022. Vol. 34, No. 7. P. 73–93.

45. Kouchaki S., et al. AI- and IoT-Enabled Solutions for Healthcare. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 8. Article 2607. DOI: 10.3390/s24082607.

46. Joseph P., et al. Regressive Machine Learning for Real-Time Monitoring of Bedridden Patients. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 21. Article 9978. DOI: 10.3390/app14219978.

47. Guida R., et al. Powering Smart Wireless Implantable Medical Devices. *Ad Hoc Networks*. 2025. Article 103748. DOI: 10.1016/j.adhoc.2024.103748.

48. Irshad R. R., et al. Towards Enhancing Security of IoT-Enabled Healthcare Systems. *Heliyon*. 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22440.

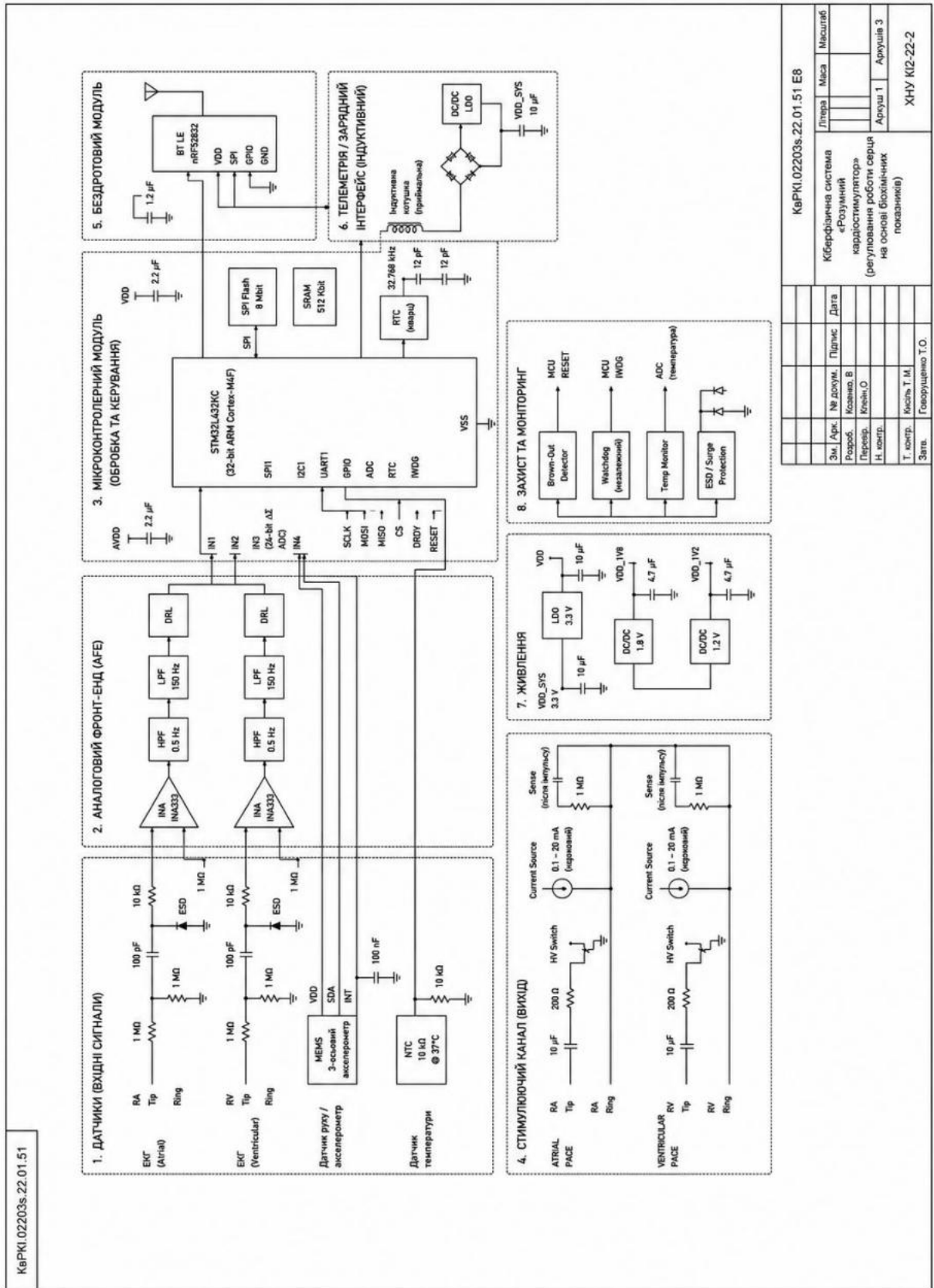
49. Korupolu A., Hack T., Ghadami O., Jain A., Hall D. A. From Wearables to Implantables: Harnessing Sensor Technologies for Continuous Health Monitoring. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*. 2025. Vol. 19, No. 5. P. 852–866.

50. Kim H., Rigo B., Wong G., Lee Y. J., Yeo W. H. Advances in Wireless, Batteryless, Implantable Electronics for Real-Time, Continuous Physiological Monitoring. *Nano-Micro Letters*. 2024. Vol. 16. Article 52. DOI: 10.1007/s40820-023-01272-6.

# ДОДАТОК А

## (обов'язковий)

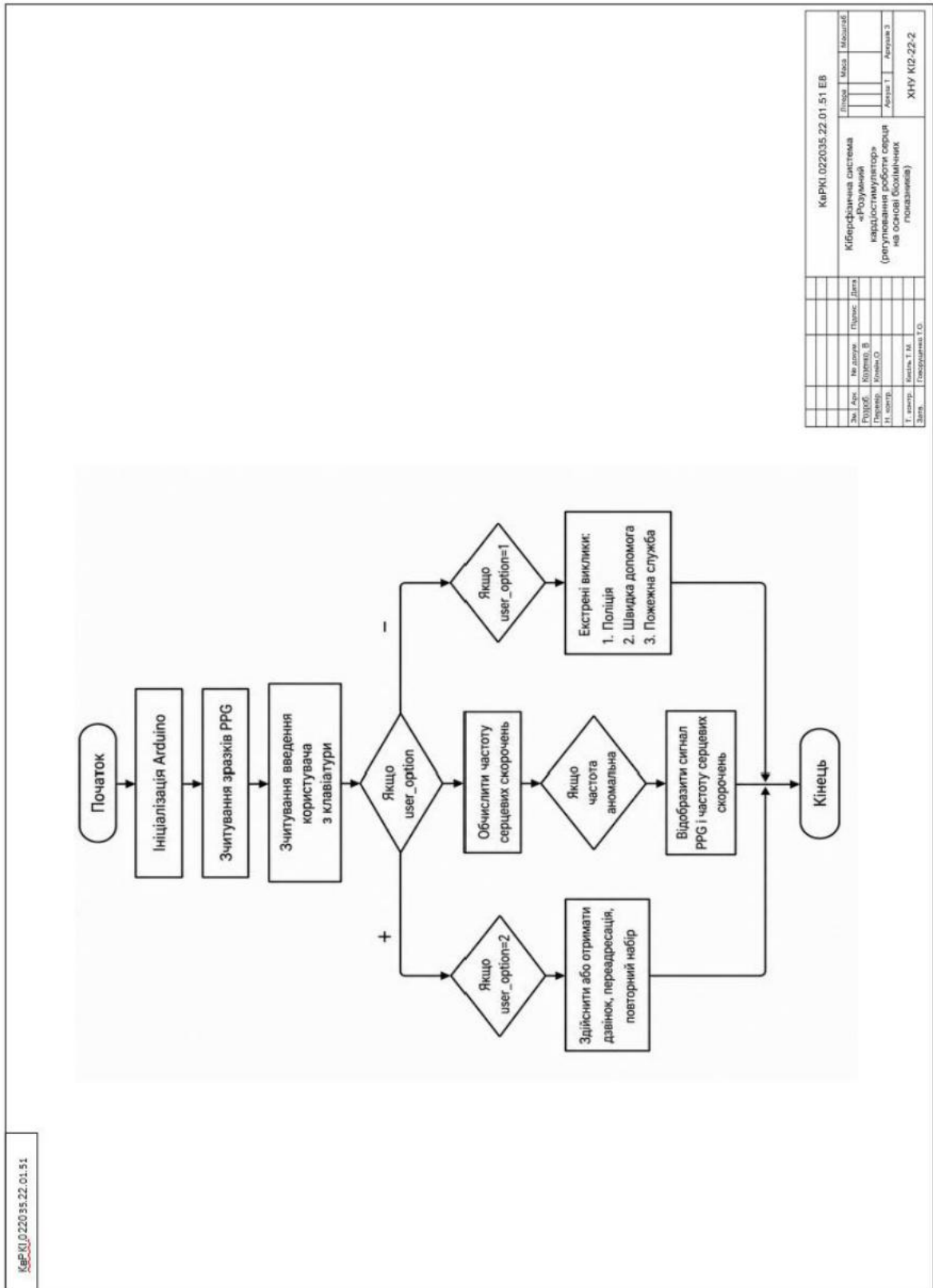
Копія креслення «Загальна структура кіберфізичної системи»



# ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

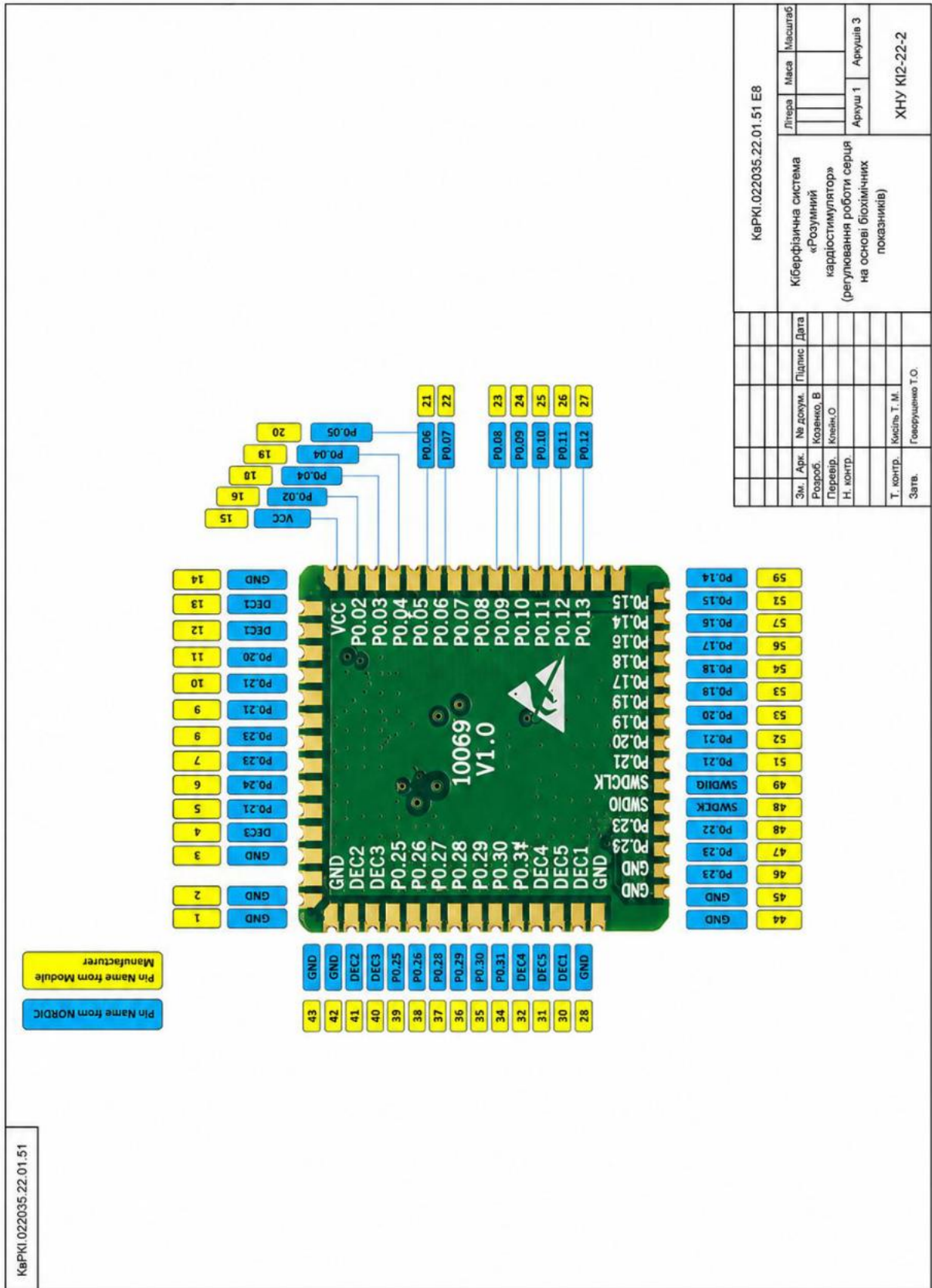
Копія креслення «Блок-схема алгоритму роботи кіберфізичної системи»



# ДОДАТОК В

(обов'язковий)

Копія креслення «Модуль бездротового зв'язку nRF52832»



КвРКІ.022035.22.01.51

КвРКІ.022035.22.01.51 E8			
Літера	Маса	Місцетаб	
Кіберфізична система «Розумний кардіостимулятор» (регулювання роботи серця на основі біохімічних показників)	Аркуш 1	Аркуш 3	
ХНУ КІ2-22-2			
Зм. Арк.	№ доум.	Підпис	Дата
Розроб. Кравченко В			
Перевір. Кравченко В			
Н. контр.			
Т. контр. Коваль Т. М.			
Затв. Говорушко Т. О.			

Зав. кафедри КПС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Вадим КОЗЕНКО

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-2

### 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 червня 2026 року *Козенко*

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

## ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ

Направляється студент Козенко Вадим Миколайович на захист кваліфікаційної роботи  
(прізвище, ім'я, по батькові)

за спеціальністю 123 - Комп'ютерна інженерія

На тему: Кіберфізична система "Розумний кардіостимулятор"

Кваліфікаційна робота, рецензія і довідка про перевірку на академічні запозичення додаються.

*В.О.*

Декан факультету



ДОВІДКА УСПІШНОСТІ

*Сергій Мисенко*

(ім'я, прізвище)

Козенко В.М. з 2022 по 2025 роки повністю виконав навчальний план спеціальності з таким розподілом оцінок за:

національною шкалою: відмінно 0,00 %, добре 3,70 %, задовільно 96,30 %.

шкалою ЄКТС: А 0,00 %, В 0,00 %, С 3,70 %, D 3,70 %, E 92,59 %.

Методист факультету

*Ждан*

(підпис)

*Микола Кошарко*

(ім'я, прізвище)

### ВИСНОВОК КЕРІВНИКА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ОЦІНКИ

Студент відповідально поставився до виконання заданої роботи, показав належний рівень знань за даними та вміння застосовувати їх на практиці. Робота виконана відповідно до поставлених умов і може бути позитивно оцінена.

Оцінка кваліфікаційної роботи

задовільно E (60)

Керівник кваліфікаційної роботи

*Ю*

(підпис)

*Олександр Клейн*

(ім'я, прізвище)

" 01 " 06

2026 р.

### ВИСНОВОК КАФЕДРИ ПРО КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Кваліфікаційну роботу розглянуто. Студент Козенко В.М. допускається до її захисту на екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

*МІС*

(назва)

*О.Побабко*

(підпис, ім'я, прізвище)

" 01 " 06

2026 р.

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система «Розумний кардіостимулятор»  
(регулювання роботи серця на основі біохімічних показників)

Автор Вадим КОЗЕНКО

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: асистент, Олександр КЛЕЙН

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

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

Підтвердження:

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

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.

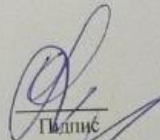
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 5,04% і адресується до 31 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 1%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

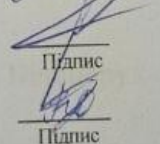
11.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олександр КЛЕЙН  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

## 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: Вадим КОЗЕНКО

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система «Розумний кардіостимулятор» (регулювання роботи серця на основі біохімічних показників)

Експерт: Олександр КЛЕЙН

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 5.04%

Коефіцієнт подібності 2: 1.26%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 1

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-11 02:20:58.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

Обґрунтування:

2026-06-11

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

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

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 10%

ID: 274537 Назва: БКР Кіберфізична система «Розумний кардіостимулятор» (регулювання роботи серця на основі біохімічних показників) Додано в БД: 2026-06-10 Автора: Вадим КОЗЕНКО Керівники: Олександр КЛЕЙН Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	92935	651	1912 (2%)	30 (5%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Козенко Вадим Миколайович

Тема: Кіберфізична система «Розумний кардіостимулятор» (регулювання роботи серця на основі біохімічних показників)

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 59

1. У кваліфікаційній роботі розроблено кіберфізичну систему «Розумний кардіостимулятор», призначену для адаптивного регулювання роботи серця на основі аналізу фізіологічних та біохімічних показників організму. Для реалізації системи було використано модульний підхід, що включає збір даних із сенсорів, попередню обробку та фільтрацію сигналів, аналіз показників стану організму, алгоритм прийняття рішень і формування керуючих впливів для кардіостимуляції. Розроблена система забезпечує моніторинг параметрів у режимі реального часу, передачу даних через бездротовий канал зв'язку та відображення результатів у веб-інтерфейсі. Запропоноване рішення дозволяє автоматично адаптувати параметри стимуляції відповідно до поточного фізіологічного стану пацієнта та може бути використане як основа для створення інтелектуальних медичних систем нового покоління.

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

3. У першому розділі проведено аналіз предметної області, розглянуто особливості використання кіберфізичних систем у сучасній кардіології, досліджено принципи функціонування систем кардіостимуляції та виконано огляд існуючих апаратних і програмних рішень. У другому розділі сформульовано вимоги до кіберфізичної системи «Розумний кардіостимулятор», розроблено її загальну структуру, обрано апаратні та програмні компоненти, а також спроектовано алгоритми обробки даних і прийняття рішень. У третьому розділі реалізовано

програмно-апаратну модель системи, розроблено веб-інтерфейс моніторингу, виконано інтеграцію основних функціональних модулів та проведено тестування, яке підтвердило працездатність і коректність функціонування розробленої кіберфізичної системи.

4. До позитивних сторін роботи належать використання сучасного підходу до побудови кіберфізичних систем, модульна архітектура розробленої системи, інтеграція сенсорних модулів, алгоритмів обробки даних та засобів бездротового зв'язку в єдиному середовищі. Розроблена система забезпечує адаптивне керування параметрами кардіостимуляції на основі аналізу фізіологічних і біохімічних показників, підтримує моніторинг у режимі реального часу та відображення даних через веб-інтерфейс. Практична цінність роботи полягає у можливості використання розробленої системи як дослідницького прототипу для подальшого розвитку інтелектуальних медичних пристроїв і кіберфізичних систем персоналізованого моніторингу стану пацієнтів.

5. До недоліків роботи можна віднести відсутність повноцінної інтеграції з реальними медичними сенсорами та імплантованим обладнанням, використання спрощеної моделі аналізу фізіологічних і біохімічних показників, а також обмежену перевірку роботи системи в умовах, наближених до реального медичного застосування. Крім того, система має переважно дослідницько-прототипний характер і потребує подальшого розвитку, зокрема вдосконалення алгоритмів прийняття рішень, підвищення надійності, енергоефективності та відповідності вимогам безпеки для використання у реальних кіберфізичних медичних системах.

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

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

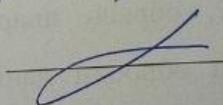
8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

9. Оцінка дипломної роботи: добре

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

Белосилка І. П. Зев. аоф. ППЗ, ХДУ

“ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

 (підпис)