

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система збору, передавання та візуалізації фізіологічних показників людини на основі ESP32

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 022079.22.01.59 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група K12-22-1



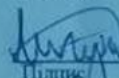
Підпис

Максим САЛЯМОН

Ініціали, прізвище

Керівник

Науковий ступінь, учене звання



Підпис

Олексій ЛИГУН

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер канд. фіз.-мат. наук, доцент

Науковий ступінь, учене звання



Підпис

Тетяна КИСІЛЬ

Ініціали, прізвище

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



Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

дата

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШОЇ (БАКАЛАВРСЬКОЇ)


Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідуюча кафедрою КІІС

 Ольга ПАВЛОВА

" 10 " 01 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Саямону Максиму Володимировичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система збору, передавання та візуалізації фізіологічних показників людини на основі ESP32

Керівник проекту (роботи) Лигун Олексій Олегович, асистент

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

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) \_\_\_\_\_

Теоретичні основи досліджуваної проблеми

Проектування архітектури та програмно-апаратна реалізація системи моніторингу фізіологічних показників

Програмно-апаратна реалізація та тестування працездатної системи

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

Структура кіберфізичної системи

Схема електрична принципова

Емуляція апаратного забезпечення у Wokwi

## 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 проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (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 – теоретичні основи досліджуваної проблеми	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – проектування архітектури та програмно-апаратна реалізація системи моніторингу фізіологічних показників	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація та тестування працездатності системи	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	24.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	25.05.2026	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач СМ  
ПідписМаксим САЛЯМОН  
Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

Лигун  
ПідписОлексій ЛИГУН

Імя, ПРІЗВИЩЕ



## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система збору, передавання та візуалізації фізіологічних показників людини на основі ESP32 (вимірювання пульсу та рівень кисню в крові, температуру тіла, активність руху)».

Автор роботи: Максим САЛІЯМОН.

Керівник роботи: Олексій ЛИГУН.

Пояснювальна записка: 58 с., 15 рис., 4 дод., 50 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

ESP32, МОНИТОРИНГ, ОХОРОНА ЗДОРОВ'Я, ПУЛЬС, САТУРАЦІЯ, ТЕМПЕРАТУРА ТІЛА.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню кіберфізичної системи для моніторингу фізіологічних показників людини на базі мікроконтролера ESP32. Актуальність теми зумовлена необхідністю створення доступних інструментів превентивної медицини та дистанційного контролю стану здоров'я в умовах цифровізації охорони здоров'я.

Метою роботи є проектування, програмно-апаратна реалізація та тестування системи для збору, обробки та візуалізації даних про пульс, рівень сатурації киснем ( $SpO_2$ ) та температуру тіла в режимі реального часу. Для досягнення мети виконано аналіз сучасних методів фотоплетизмографії, обґрунтовано вибір апаратної платформи з підтримкою IoT-протоколів, розроблено алгоритми цифрової фільтрації сигналів та створено клієнтський веб-додаток із використанням хмарних сервісів Firebase.

СМВ

Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Теоретичні основи досліджуваної проблеми.....	6
1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань.....	6
1.2 Порівняльний аналіз переваг та недоліків існуючих рішень.....	10
1.2.1 Samsung S9110.....	11
1.2.2 Samsung Galaxy Ring.....	12
1.2.3 Garmin Vivosmart 5.....	12
1.2.4 Apple Watch Ultra 2.....	13
1.2.5 Fitbit Sense 2.....	14
1.3 Підходи до вирішення задачі за темою дослідження.....	16
1.4 Постановка задачі.....	16
1.5 Висновки до першого розділу.....	17
2 Проектування архітектури та програмно-апаратна реалізація системи моніторингу фізіологічних показників.....	19
2.1 Аналіз предметної області та архітектура системи.....	19
2.2 Апаратне забезпечення та локальний інтерфейс.....	25
2.3 Алгоритми функціонування та обробка сигналів.....	30
2.4 Мережева взаємодія, протоколи та безпека.....	33
2.5 Аналіз характеристик та оцінка точності системи.....	35
2.6 Оцінка проєктного рішення та перспективи розвитку.....	37
2.7 Висновки до другого розділу.....	39
3 Програмно-апаратна реалізація та тестування працездатності системи.....	41
3.1 Реалізація апаратної та програмної складових системи.....	41
3.2 Розробка клієнтського веб-додатку.....	50
3.3 Методика та аналіз результатів експериментального тестування.....	54

КьРКІ.022079.22.01.59 ПЗ				
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата
Виконав		Максим САЛЕНКО		
Перевід.		Олександр ЛІГУН		
Н.КОНТР.		Тетяна КИСТЬ		
Затверд.		Ольга ПАВЛОВА		01.06
Кіберфізична система збору, передавання та візуалізації фізіологічних показників людини на основі				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		у	2	58
ХНУ КІ2-22-1				

3.4 Порівняльний аналіз, оцінка ефективності та перспективи вдосконалення .....	58
3.5 Висновки до третього розділу .....	61
Висновки.....	64
Перелік джерел посилань .....	65
Додаток А Копія креслення «Структура кіберфізичної системи» .....	71
Додаток Б Копія креслення «Схема електрична принципова».....	72
Додаток В Копія креслення «Емуляція апаратного забезпечення у Wokwi» .....	73
Додаток Г Лістинг програмного забезпечення прошивки мікроконтролера .....	74

## ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій особливого значення набувають системи моніторингу фізіологічного стану людини. Зростання рівня захворюваності, підвищення навантаження на медичні установи та необхідність своєчасного виявлення відхилень у стані здоров'я обумовлюють потребу у створенні доступних, ефективних і простих у використанні технічних рішень. У цьому контексті особливої актуальності набувають системи, побудовані на основі концепції Інтернету речей, які дозволяють здійснювати безперервний збір, обробку та передачу даних у режимі реального часу.

Сучасні мікроконтролери, такі як ESP32, відкривають широкі можливості для створення компактних і функціональних пристроїв, здатних виконувати складні обчислення та забезпечувати мережеву взаємодію. Використання таких платформ у поєднанні з веб-технологіями дозволяє створювати інтегровані системи, які забезпечують не лише збір даних, а й їх візуалізацію та аналіз.

Актуальність даної роботи полягає у необхідності розробки доступної системи моніторингу стану здоров'я, яка може бути використана для контролю основних фізіологічних параметрів у повсякденному житті. Така система дозволяє підвищити рівень обізнаності користувача про свій стан і сприяє своєчасному виявленню можливих відхилень.

Метою даної роботи є розробка та дослідження системи моніторингу стану здоров'я на основі мікроконтролера ESP32 із можливістю збору, обробки та передачі даних у режимі реального часу з подальшим їх відображенням у веб-додатку.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються задачі, пов'язані з аналізом предметної області, вибором апаратних і програмних засобів, проєктуванням структури системи, розробкою алгоритмів обробки даних, реалізацією програмного забезпечення та проведенням тестування.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єктом дослідження є процес моніторингу фізіологічних параметрів людини із використанням вбудованих систем.

Предметом дослідження є методи та засоби побудови системи збору, обробки та передачі даних про стан здоров'я з використанням мікроконтролера та мережевих технологій.

Практичне значення роботи полягає у створенні працездатної системи, яка може бути використана як основа для подальших досліджень і розробок у сфері Інтернету речей та систем моніторингу здоров'я.

Робота складається з трьох розділів, у яких послідовно розглядаються теоретичні аспекти, проектування, реалізація та тестування розробленої системи.

У першому розділі проведено аналіз сучасних систем моніторингу стану здоров'я, розглянуто принципи роботи технологій Інтернету речей та досліджено особливості використання мікроконтролерів у медичних і моніторингових системах. Також здійснено огляд існуючих апаратних платформ, сенсорів та програмних засобів, які можуть бути використані для реалізації системи моніторингу фізіологічних показників.

Другий розділ присвячений проектуванню та реалізації системи. У ньому описано структуру апаратної частини, схему підключення компонентів, алгоритми роботи програмного забезпечення мікроконтролера та особливості передачі даних до веб-додатку. Крім того, наведено опис реалізації серверної частини та інтерфейсу користувача для відображення результатів вимірювань.

У третьому розділі виконано тестування створеної системи, проведено аналіз результатів роботи та оцінено ефективність функціонування розробленого програмно-апаратного комплексу. На основі отриманих результатів зроблено висновки щодо працездатності системи та можливостей її подальшого вдосконалення й практичного застосування.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПРОБЛЕМИ

## 1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань

У сучасному світі спостерігається стійка тенденція до глобальної цифровізації охорони здоров'я, де дедалі більше людей починають свідомо та регулярно слідкувати за станом свого організму. У межах превентивної медицини повинна забезпечуватись можливість самостійно та оперативно вимірювати такі показники, як пульс, температура тіла та рівень насичення крові киснем. Це дозволяє не лише оцінити поточний загальний стан організму в домашніх умовах, а й своєчасно виявити патологічні відхилення, що допомагає запобігти розвитку серйозних хронічних хвороб[3, 5, 30].

Сучасні академічні та прикладні дослідження підтверджують, що активна інтеграція складних кіберфізичних систем (CPS) у медичну галузь дозволяє здійснювати безперервний, високоточний моніторинг фізіологічних параметрів користувача у режимі реального часу [12, 18, 23, 45]. Це створює основу для переходу від епізодичної діагностики до постійного нагляду.

Історія розвитку методів моніторингу серцево-судинної системи є тривалою. Ще в 1847 році дослідники вперше помітили фізичне явище: червоне світло по-різному проходить крізь біологічні тканини, зокрема крізь кисть руки з накладеним артеріальним джгутом, залежно від наповнення судин кров'ю. Власне, з цього спостереження і почалася еволюція сучасних пульсометрів. До цього моменту для вимірювання параметрів пульсу використовували громіздкі та складні механічні пристрої – сфігмографи. Іншим методом було візуальне спостереження за зміною кольору слизової оболонки губ, нігтів чи оцінка швидкості капілярного наповнення після натискання, проте такі методи були суб'єктивними та неточними. Через складність налаштування сфігмографи використовувались в умовах стаціонарних лікарень під наглядом кваліфікованого персоналу.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Процес вимірювання фізіологічних показників став значно простішим та доступнішим лише з появою компактних електричних пристроїв та напівпровідникових сенсорів. У 1896 році було запропоновано вимірювати артеріальний тиск манжетним методом. Принцип полягав у накладанні на плече спеціальної манжети, яка нагніталася повітрям до моменту перетискання артерії, що заклало основу для сучасної тонометрії.

На початку ХХ століття наукова думка просунулася до створення перших плетизмографів – приладів, призначених для реєстрації динамічних змін об'єму крові в тканинах і органах. Це стало основним етапом у розвитку інструментальних методів дослідження периферичного кровообігу.

У 1930–1940-х роках почалася активна експлуатація фотоелектричних методів вимірювання. З'явилися перші фотоплетизмографи (PPG-сенсори), які реєстрували зміни інтенсивності світлового потоку, що проходить крізь тканини або відбивається від них. Оскільки об'єм крові в судинах змінюється відповідно до серцевого циклу, це дозволило з високою точністю контролювати пульс. На відміну від механічних аналогів, які були надто великими, чутливими до найменшого руху пацієнта та складними у калібруванні, фотоелектричні методи стали справжньою технологічною революцією в медичній діагностиці.

Наступним концептуальним кроком стало відкриття принципу спектрофотометричного аналізу крові у 1970-х роках. Вчені виявили, що оксигемоглобін (насичений киснем) і дезоксигемоглобін (відновлений) мають різні спектри поглинання світла. На основі цього явища були створені перші пульсоксиметри, здатні одночасно визначати частоту серцевих скорочень та рівень сатурації – насичення крові киснем ( $SpO_2$ ). Технічно метод базується на використанні двох світлодіодів з різними довжинами хвиль (зазвичай червоного та інфрачервоного спектрів). Порівнюючи коефіцієнти поглинання цих хвиль, мікропроцесор приладу вираховує точний відсоток насичення киснем за допомогою складних математичних алгоритмів.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні високотехнологічні системи пульсоксиметрії та комплексного моніторингу серцевої діяльності базуються на синергії прецизійних оптичних сенсорів та методів цифрової обробки сигналів (DSP), що детально розглядається в контексті сучасних досліджень медичних кіберфізичних систем [14, 17, 20, 44].

Паралельно з кардіологічними датчиками відбувалося вдосконалення засобів термічного контролю. На зміну традиційним та потенційно небезпечним ртутним термометрам прийшли цифрові рішення на базі термісторів і термопар. Наприкінці ХХ століття з'явилися інфрачервоні пірометри, які дозволили здійснювати миттєвий безконтактний контроль температури тіла.

На початку ХХІ століття стрімкий розвиток мікроелектроніки дозволив об'єднати всі ці технології в єдині цифрові екосистеми. Це призвело до появи широкого спектра портативних «носимих» пристроїв (wearables): фітнес-трекерів, «розумних» годинників та мініатюрних медичних моніторів.

Сучасна інтеграція концепції Internet of Things (IoT) та хмарних обчислень відкрила безпрецедентні можливості для передачі даних безпосередньо до медичних інформаційних систем, реалізуючи концепцію віддаленого моніторингу пацієнтів у реальному часі [1, 9, 16, 24, 36, 50]. У межах розвитку глобального сегмента Internet of Medical Things (IoMT) особлива увага приділяється питанням безпеки та конфіденційності при передачі чутливих медичних даних мережами загального користування [2, 7, 22, 39, 46, 49]. Окрім збору даних, активно впроваджуються інтелектуальні алгоритми предиктивного аналізу фізіологічних показників із застосуванням штучного інтелекту та машинного навчання, що дозволяє прогнозувати погіршення стану пацієнта ще до появи явних симптомів [10, 29, 35, 38, 47, 48]. Сам же термін «кіберфізичні системи» остаточно закріпився як основний елемент парадигми четвертої промислової революції (Industry 4.0).

Подальший розвиток кіберфізичних систем у сфері охорони здоров'я сприяв формуванню концепції персоналізованої медицини, у межах якої кожен користувач отримує можливість постійного контролю власних фізіологічних

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметрів незалежно від місця перебування. Використання мікроконтролерних платформ, бездротових технологій передачі даних та хмарних сервісів дозволило створювати доступні за вартістю, компактні та енергоефективні системи моніторингу, орієнтовані як на професійне медичне застосування, так і на повсякденне домашнє використання.

У таких умовах значного поширення набули системи віддаленого збору та аналізу біометричних даних, які дозволяють у режимі реального часу передавати інформацію лікарям або родичам пацієнта через мережу Інтернет. Завдяки цьому значно підвищується швидкість реагування на зміни стану організму та зменшується ризик розвитку небезпечних ускладнень.

Сучасні кіберфізичні системи медичного призначення складаються з декількох взаємопов'язаних компонентів: сенсорного рівня, обчислювального модуля, мережевої інфраструктури та програмного забезпечення для візуалізації й аналізу інформації. Сенсорний рівень забезпечує збір фізіологічних параметрів за допомогою спеціалізованих датчиків, обчислювальний модуль виконує первинну обробку даних, а мережеві засоби забезпечують передачу інформації до віддалених серверів або мобільних застосунків. На верхньому рівні програмне забезпечення здійснює збереження, аналіз та графічне відображення отриманих показників користувача.

Однією з важливих переваг сучасних IoT-орієнтованих медичних систем є можливість безперервного накопичення статистичних даних про стан організму. Аналіз історії вимірювань дозволяє виявляти приховані тенденції змін фізіологічних параметрів, оцінювати ефективність лікування, прогнозувати ризики розвитку захворювань та автоматично формувати попередження у випадку перевищення значень. У результаті такі системи перетворюються не лише на інструмент вимірювання, а й на інтелектуальний засіб підтримки прийняття медичних рішень.

Таким чином, розвиток кіберфізичних систем у галузі медичного моніторингу є закономірним результатом еволюції сенсорних технологій,

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроелектроніки, цифрової обробки сигналів та мережевих комунікацій. Сучасні системи моніторингу здоров'я поєднують у собі функції збору, передачі, аналізу та інтелектуальної інтерпретації фізіологічних даних, що робить їх важливим елементом цифрової медицини майбутнього.

## 1.2 Порівняльний аналіз переваг та недоліків існуючих рішень

Використання сучасних технологій вимірювання пульсу, рівня кисню у крові та температури створює умови для ефективної підтримки людей із хронічними захворюваннями. Такі рішення дозволяють пацієнтам контролювати життєво важливі показники в комфортних домашніх умовах, значно знижуючи навантаження на медичні установи та позбавляючи необхідності постійного фізичного відвідування лікаря для рутинних перевірок [8, 19, 25].

Будь-яка подібна система вимагає використання надійних сенсорів та датчиків. Саме вони виступають інтерфейсом між біологічним об'єктом та цифровим середовищем, надаючи первинну інформацію про зовнішні та внутрішні умови: рівень сатурації, термічний стан епідермісу та динаміку серцебиття. Сучасні носимі рішення є складними апаратно-програмними комплексами, що інтегрують у собі надчутливі сенсори, енергоефективні мікроконтролери та мережеві інтерфейси (Wi-Fi, Bluetooth) для безперебійного передавання даних у хмарні сервіси обробки [13, 26, 34].

На ринку споживчої електроніки сформувався окремий сегмент спеціалізованих систем: від медичних пульсоксиметрів до багатофункціональних смарт-годинників. Новим етапом розвитку стало впровадження концепції цифрових двійників (Digital Twins) у медицині, що дозволяє створювати динамічні цифрові моделі фізіологічного стану людини на основі масивів даних безперервних вимірювань [28]. Водночас актуалізується питання захисту інформації, де розглядаються блокчейн-рішення для забезпечення цілісності та незмінності медичних записів у CPS-системах [27], а

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також механізми активного захисту від несанкціонованих вторгнень та розробка стійкого до шкідливого ПЗ програмного забезпечення [31, 32].

### 1.2.1 Samsung S9110

Samsung S9110 (рисунок 1.1) представляє історичний інтерес як один з перших повноцінних смарт-годинників, що з'явилися на комерційному ринку. Вихід цього гаджета став знаковим етапом у розвитку лінійки носимих пристроїв компанії Samsung, заклавши основи для майбутніх стандартів індустрії. На момент свого активного просування у 2014 році, пристрій функціонував на базі власної закритої екосистеми Tizen OS. Це накладало суворі обмеження на програмну гнучкість: додавання будь-яких сторонніх пристроїв або розширення функціонала було неможливим без проходження складної та тривалої процедури корпоративної сертифікації.

Попри обмеженість за сучасними мірками, поява подібних піонерських пристроїв створила необхідне підґрунтя для швидкої еволюції сучасних IoT-орієнтованих медичних систем [6, 33].



Рисунок 1.1 – Смарт годинник [41]

### 1.2.2 Samsung Galaxy Ring

Новим словом у мініатюризації персональної діагностики стало розумне кільце Samsung Galaxy Ring (рисунок 1.2), офіційно представлене в липні 2024 року. Цей пристрій є втіленням ідеї непомітного, але максимально щільного контакту з тілом користувача для забезпечення безперервного цілодобового моніторингу здоров'я. Кільце зарекомендувало себе як один із найбільш точних та ергономічних приладів у своєму класі, хоча його головним недоліком залишається обмежена сумісність лише з екосистемою Android та пристроями Samsung.

Такі сучасні носимі рішення забезпечують не тільки збір даних, а й повноцінну інтеграцію з мобільними додатками, гарантуючи постійний моніторинг життєвих показників із можливістю глибокої віддаленої аналітики на серверній стороні [15, 21, 37].



Рисунок 1.2 – Розумне кільце [42]

### 1.2.3 Garmin Vivosmart 5

Garmin Vivosmart 5 (рисунок 1.3) це тонкий фітнес браслет який є бюджетним рішенням серед аналогів. Він вийшов на ринок у 2021 році, а оновлена версія Gen 4 у 2024. Це один з найбільш відомих і технологічно просунутих носимих пристроїв для цілодобового моніторингу здоров'я. Oura Ring вважається лідером у сегменті розумних кілець завдяки високій точності

вимірювань, тривалій автономності та глибокому аналізу даних сну і відновлення організму. Недоліком є те, що пристрій не може вимірювати температуру тіла.



Рисунок 1.3 – Фітнес-браслет Garmin Vivosmart 5 [43]

Сучасні носимі пристрої забезпечують постійний моніторинг життєвих показників із можливістю віддаленої обробки даних [15, 21, 37].

#### 1.2.4 Apple Watch Ultra 2

Одним із найпотужніших сучасних носимих пристроїв для моніторингу здоров'я є Apple Watch Ultra 2 (рисунок 1.4), представлений у вересні 2023 року (оновлена версія Apple Watch Ultra). Це флагманська модель компанії Apple, орієнтована на спортсменів, любителів екстремальних видів спорту та користувачів, які потребують максимально точного та всебічного моніторингу фізіологічних показників.

Основні вимірювані параметри включають постійний моніторинг частоти серцевих скорочень, виявлення аритмії, вимірювання SpO<sub>2</sub>, температури тіла, рівня кисню в крові, а також аналіз сну, рівня стресу та відновлення організму. Крім того, пристрій підтримує функцію Emergency SOS, виявлення падіння,

автомобільної аварії та можливість двостороннього зв'язку через супутниковий зв'язок (у деяких регіонах).

Apple Watch Ultra 2 працює під управлінням watchOS і тісно інтегрується з екосистемою Apple. Автономність становить до 36 годин у звичайному режимі та до 72 годин в режимі низького енергоспоживання. Пристрій має сертифікацію водозахисту 100 метрів (EN13319) та MIL-STD 810H, що робить його придатним для використання в екстремальних умовах.



Рисунок 1.4 – Apple Watch Ultra 2 [43]

### 1.2.5 Fitbit Sense 2

Fitbit Sense 2 (рисунок 1.5) є одним із передових спеціалізованих смарт-годинників, розроблених з акцентом на поглиблений моніторинг фізичного стану користувача. Цей гаджет пропонує комплексний підхід до збору біометричних даних, що позиціонує його як вагомий інструмент у сфері персональної телемедицини та Інтернету медичних речей (IoMT).

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.5 – Fitbit Sense 2 [43]

Визначальною технологічною особливістю цієї моделі є наявність спеціалізованого сенсора cEDA (Continuous Electrodermal Activity), який забезпечує безперервне відстеження електродермальної активності шкіри для виявлення фізіологічних маркерів стресу. Апаратна база пристрою також охоплює високочутливі оптичні та електричні датчики для вимірювання частоти серцевих скорочень (із можливістю генерації ЕКГ), рівня насичення крові киснем ( $SpO_2$ ), а також високоточний інфрачервоний термодатчик для реєстрації динаміки температури шкіри під час сну.

Інтеграція та обробка зібраних масивів інформації здійснюється через спеціалізовані хмарні сервіси, де алгоритми формують детальні аналітичні звіти про якість сну, рівень фізіологічного відновлення та загальний стан серцево-судинної системи. Завдяки високій автономності, що сягає 6 діб роботи від одного заряду, пристрій гарантує сталість та безперервність часових рядів під час тривалого моніторингу. Це є необхідною умовою для побудови точних цифрових моделей стану здоров'я та інтеграції гаджета у сучасні кіберфізичні системи [18, 44].

### 1.3 Підходи до вирішення задачі за темою дослідження

Для успішної розробки та впровадження кіберфізичної системи збору, обробки, бездротового передавання та візуалізації фізіологічних показників людини найбільш доцільним виглядає використання платформи ESP32. Цей мікрокомп'ютер (SoC) має вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth. Мікроконтролерні платформи такого типу широко застосовуються у професійних та аматорських медичних CPS завдяки їхній високій обчислювальній потужності, низькому енергоспоживанню та здатності працювати в операційних системах реального часу [4, 11]. Численні тести підтверджують доцільність вибору ESP32 як основного обчислювального вузла для систем моніторингу та освітніх проєктів у сфері біомедичної інженерії [40].

З точки зору програмної реалізації, розробка може здійснюватися мовами MicroPython (для швидкого прототипування) або C++ (у середовищі Arduino IDE/ESP-IDF для максимальної продуктивності). Це дозволяє гнучко підходити до реалізації алгоритмів фільтрації сигналів, усунення шумів з сенсорів та управління енергозбереженням пристрою.

### 1.4 Постановка задачі

Основною метою роботи є створення прототипу кіберфізичної системи для моніторингу стану здоров'я. Відповідно до мети, необхідно вирішити наступний перелік завдань:

1) провести комплексний аналіз наявних ринкових та наукових рішень, на основі чого здійснити обґрунтований вибір технічної стратегії, апаратних компонентів та програмних засобів для реалізації проєкту;

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2) спроектувати та розробити працездатну апаратну підсистему моніторингу показників людини, реалізувати програмну логіку збору даних та сформулювати висновки щодо ефективності створеного рішення.

Розроблювана система повинна суворо відповідати актуальним архітектурним принципам побудови кіберфізичних систем у сфері охорони здоров'я. До переліку вимог входять: висока надійність зняття показників, безпека збереження даних, масштабованість архітектури та можливість безшовної інтеграції з існуючим IoT-середовищем через стандартні протоколи передачі даних [21, 24].

### 1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено всебічний аналіз теоретичних засад та сучасного стану розробки кіберфізичних систем для моніторингу фізіологічних показників людини. Дослідження підтвердило, що в умовах глобальної цифровізації охорони здоров'я та переходу до превентивної медицини необхідне створення засобів дистанційної діагностики. Розгляд еволюції методів вимірювання дозволив встановити, що сучасна фотоплетизмографія та спектрофотометричний аналіз крові є найбільш ефективними неінвазивними технологіями для оперативного контролю пульсу та рівня сатурації киснем.

Порівняльний аналіз існуючих комерційних рішень, таких як смарт-годинники та фітнес-трекери провідних виробників, продемонстрував високий рівень технологічної зрілості сучасних носимих пристроїв. Водночас виявлено суттєві обмеження, пов'язані із закритістю корпоративних екосистем та складністю інтеграції таких пристроїв у персоналізовані дослідницькі або локальні мережі моніторингу. Це обумовлює необхідність розробки відкритої архітектури на базі доступних апаратних засобів.

На основі вивчених підходів до вирішення завдання було обґрунтовано вибір мікроконтролерної платформи ESP32 як основного обчислювального вузла системи. Цей вибір базується на поєднанні енергоефективності пристрою та наявності вбудованих модулів бездротового зв'язку. Сформульована постановка задачі передбачає створення прототипу, який забезпечить надійне зняття даних, їхню первинну обробку та передачу в цифрову систему для подальшого аналізу, що відповідає актуальним вимогам до архітектури сучасних кіберфізичних медичних комплексів.

Крім того, у межах розділу було визначено основні вимоги до функціонування майбутньої системи, серед яких важливе місце займають точність вимірювання, стабільність передачі інформації, автономність роботи та можливість масштабування програмно-апаратного комплексу. Проведений аналіз показав, що використання модульного підходу до побудови системи забезпечує гнучкість при модернізації окремих компонентів та дозволяє адаптувати систему до різних умов експлуатації.

Отримані результати теоретичного дослідження стали основою для подальшого проектування структури кіберфізичної системи, вибору сенсорних модулів та розробки алгоритмів обробки сигналів. Таким чином, перший розділ сформував науково-технічне підґрунтя для практичної реалізації системи моніторингу фізіологічних показників людини з використанням сучасних бездротових технологій та хмарних сервісів обробки даних. Проведений аналіз також підтвердив перспективність застосування технологій Інтернету речей у сфері медичного моніторингу, оскільки вони забезпечують можливість безперервного збору та віддаленого контролю фізіологічних параметрів у режимі реального часу. Це створює передумови для підвищення ефективності раннього виявлення відхилень у стані здоров'я та оперативного реагування на потенційно небезпечні зміни показників організму.

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ФІЗІОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

### 2.1 Аналіз предметної області та архітектура системи

У сучасному інформаційно насиченому світі технологічний прогрес відбувається надзвичайно динамічно, і значна частина інновацій спрямована на підвищення якості життя. Особливу увагу привертає розробка інтелектуальних систем моніторингу здоров'я, що дають можливість безперервно відстежувати найсуттєвіші фізіологічні параметри організму. Такий підхід дедалі більше набуває значущості у контексті зростаючої поширеності хронічних захворювань, зокрема кардіологічного і респіраторного спектра, адже для багатьох пацієнтів своєчасне спостереження за станом здоров'я є не лише питанням комфорту, а життєвою необхідністю для підтримки повноцінного функціонування.

Звичайні медичні огляди, як правило, відображають лише стан пацієнта в момент візиту і часто не дають змогу зафіксувати епізодичні чи поступові відхилення від норми. Інтервали у кілька місяців між такими обстеженнями ускладнюють діагностику, оскільки багато змін можуть залишитися непоміченими. Внаслідок цього виникає очевидна потреба у створенні систем, здатних здійснювати безперервний збір і аналіз даних у режимі реального часу. Такий підхід сприяє переходу від реактивного підходу у медичній практиці до проактивного контролю стану здоров'я, дозволяючи виявляти потенційні патології на ранніх стадіях та відповідно реагувати своєчасно.

Особливої ваги набувають показники функціонування серцево-судинної системи, серед яких частота скорочень серця служить індикатором фізіологічного стану. Вона відображає не тільки фізичні навантаження та втому, але й загальний рівень стресу та відновлення після фізичних зусиль. Різне зниження насичення крові киснем (сатурації) свідчить про порушення дихальної

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

функції, які можуть загрожувати життю, зокрема через недостатнє живлення киснем життєво важливих органів, включно з мозком.

Температура тіла, хоч і є базовим, але суттєвим параметром для оцінки стану здоров'я, може сигналізувати про інфекційні процеси, терморегуляторні порушення чи реакцію організму на погодні або фізичні фактори. Рівень фізичної активності також слугує показником загального добробуту та допомагає оцінити вплив способу життя на самопочуття. Комплексний аналіз цих даних створює цілісну картину стану організму, що можна порівняти зі збиранням мозаїки, де кожен параметр є ваговою складовою.

Незважаючи на наявність великої кількості гаджетів, таких як фітнес-браслети та розумні годинники, що надають базові функції збору та аналізу даних, їх використання у навчальних або дослідницьких цілях ускладнене певними обмеженнями. Часто це дорогі пристрої з закритим програмним забезпеченням, які не дозволяють модифікацію алгоритмів чи параметрів під специфічні задачі. Таким чином, вони не надають можливості глибокого розуміння механізмів обробки даних і обмежують експерименти з новими методами аналізу в освітньому та науковому контекстах. Це порівнюється з наявністю дорогого пристрою, щодо якого користувач не має доступу до внутрішніх механізмів його роботи.

Виникає обґрунтована перспектива застосування мікроконтролерів з відкритою архітектурою, що забезпечують гнучкість у побудові систем, можливість масштабування та налаштування. ESP32 представляє собою популярну платформу, яка поєднує достатню обчислювальну потужність із низьким енергоспоживанням, містить вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth, чим суттєво спрощує створення портативних пристроїв для збору і передачі даних без потреби у додатковому обладнанні.

Інтеграція ESP32 у концепцію Інтернету речей (IoT) відкриває нові можливості для розподілених систем, де пристрої взаємодіють між собою та мережею, виконуючи конкретні завдання. Це створює передумови для

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтелектуального моніторингу, що не лише акумулює великі обсяги інформації, а й проводить її аналітичну обробку з мінімальними затримками, надаючи користувачу корисні інтерпретації та рекомендації. Отже, система не лише збирає дані, а й виявляє закономірності, прогнозує потенційні ризики.

Проектована система моніторингу здоров'я має багатoshарову структуру (рисунок 2.1), у якій кожний рівень виконує специфічні функції, працюючи в координації з іншими, подібно до організованої команди, де кожен учасник відповідає за власний напрямок діяльності. Такий підхід дозволяє ефективно розподіляти завдання між компонентами, забезпечуючи їхню інтеграцію та безперервну роботу. Це звична практика для складних інформаційних систем і надає гнучкість і адаптивність для впровадження новітніх технологій та функцій.

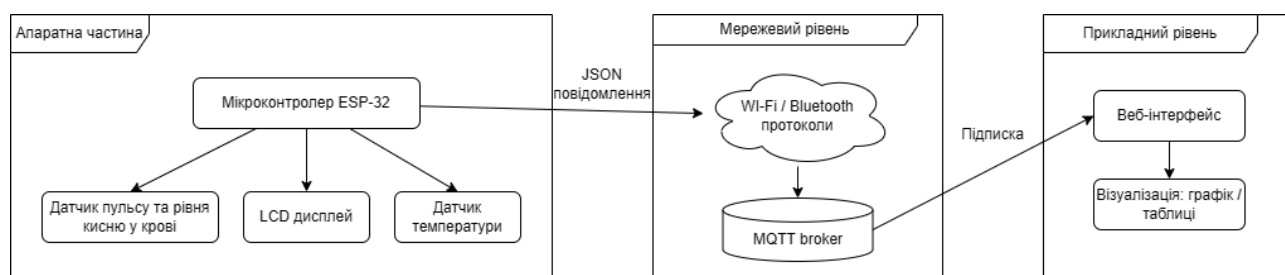


Рисунок 2.1 – Схема архітектури системи

На початковому етапі архітектури системи функціонує апаратний рівень, який формує її основу. До його складу входить комплекс спеціалізованих сенсорів, призначених для безпосередньої взаємодії з фізіологічними параметрами користувача. Ці датчики є первинними елементами збору інформації, здатними реєструвати широкий спектр біометричних показників, таких як частота серцевих скорочень або температура тіла. Вони забезпечують всебічну оцінку стану здоров'я. Процес вимірювання відбувається за допомогою різних фізичних принципів, трансформуючи біологічні сигнали в електричні. Функцію інтеграції цих різномірних сенсорних пристроїв у когерентний функціональний блок виконує мікроконтролер. Він не лише забезпечує

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

координацію їхньої роботи, але й відповідає за попередню обробку отриманих аналогових сигналів, перетворюючи їх на дискретні цифрові послідовності. Цей етап є вирішальним, оскільки саме тут відбувається конвертація сирих, необроблених даних у структуровану цифрову інформацію, що репрезентує фізіологічний статус об'єкта моніторингу. Такий механізм дозволяє системі ефективно «сприймати» та інтерпретувати початкові сигнали, що надходять від користувача, забезпечуючи надійну основу для подальшого аналізу. Фактично, цей рівень виступає у ролі перцептивного апарату системи, який забезпечує її здатність до безпосереднього збору емпіричних даних.

Подальший щабель у функціональній ієрархії архітектури системи займає мережева підсистема, функцією якої є забезпечення безперервної та захищеної передачі зібраних даних. Цей рівень відіграє вирішальну роль у зв'язку між локальним пристроєм збору інформації та віддаленими компонентами системи, які можуть бути географічно розподілені. Використання бездротових технологій зв'язку є головним аспектом, що надає системі високий ступінь мобільності та ергономічності у використанні. Це дозволяє уникнути обмежень, пов'язаних з необхідністю фізичного кабельного підключення, значно розширюючи сценарії застосування, зокрема у повсякденному житті або під час активності користувача. Передача інформації реалізується за допомогою протоколу MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), який є оптимізованим для роботи в середовищах з обмеженими ресурсами, характерних для пристроїв інтернету речей. Центральним елементом цього механізму є MQTT-брокер – проміжний серверний компонент, який ефективно керує потоками даних. Він функціонує за принципом «публікація-підписка», приймаючи повідомлення від пристроїв, що їх публікують, і переадресовуючи ці повідомлення всім підписникам, які зацікавлені в отриманні конкретної інформації. Така архітектурна модель гарантує високу ефективність обміну даними, мінімізує затримки та забезпечує масштабованість систем, що працюють з великими об'ємами даних у реальному часі. Цей підхід не тільки забезпечує надійність комунікації, але й сприяє

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимальному використанню мережевих ресурсів, підвищуючи загальну стійкість і продуктивність системи.

На найвищому рівні архітектурної ієрархії розташований користувацький веб-додаток, який слугує інтерфейсом взаємодії між системою та кінцевим користувачем. Його основне призначення полягає у представленні комплексної інформації, отриманої від нижчих рівнів, у форматі, що є інтуїтивно зрозумілим та легким для сприйняття. У рамках цього додатка оброблені дані візуалізуються за допомогою різноманітних графічних елементів, таких як динамічні графіки та структуровані таблиці, що дозволяє користувачеві швидко оцінювати поточний стан та відстежувати зміни у часі. Крім простого відображення, веб-додаток забезпечує функціональність для довгострокового зберігання зібраних даних. Дана функція може застосовуватись для проведення ретроспективного аналізу та ідентифікації стійких тенденцій у фізіологічних показниках користувача. Більше того, він надає інструменти, які допомагають у тлумаченні отриманих результатів, можливо, через інтеграцію довідкової інформації або рекомендацій. Оновлення даних у веб-додатку відбувається в реальному часі, завдяки ефективному використанню того ж MQTT-брокера, що забезпечує безперервний потік інформації від пристроїв. Після отримання, ці оновлення проходять вторинну обробку та перетворюються на зрозумілі, адаптовані для користувача індикатори. Таким чином, цей веб-додаток перетворюється з простого відображувача даних на інтелектуального персонального асистента, який активно підтримує користувача у процесі моніторингу та контролю власного стану здоров'я, сприяючи усвідомленому прийняттю рішень щодо його добробуту.

В основі розробленої архітектури лежить принцип модульності, який передбачає строгу декомпозицію системи на автономні, функціонально незалежні компоненти. Кожен модуль спроектований таким чином, щоб виконувати свої визначені функції ізольовано, мінімізуючи взаємні залежності та забезпечуючи чітке розмежування відповідальності. Цей підхід надає істотні

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переваги, дозволяючи здійснювати модернізацію, заміну або доопрацювання окремих частин системи без виникнення дестабілізуючого впливу на її інші складові. Наприклад, інтеграція нового типу сенсора, що розширює функціональні можливості моніторингу, або оновлення версії програмного забезпечення будь-якого компонента не вимагає глибоких структурних перебудов всієї системи. Завдяки цьому забезпечується висока адаптивність системи до мінливих користувацьких потреб, різноманітних сценаріїв застосування та швидкого технологічного прогресу у галузі медичної електроніки та інформаційних технологій. Модульна архітектура також сприяє спрощенню процесів тестування, налагодження та обслуговування, оскільки проблеми можуть бути локалізовані та вирішені в межах окремого модуля. Впровадження такого підходу не тільки збільшує стійкість системи до відмов, але й гарантує її довготривалу актуальність та цінність, дозволяючи ефективно інтегрувати майбутні інновації та розширення функціоналу з мінімальними ризиками та витратами. Ця гнучкість є вирішальною для підтримки конкурентоспроможності та ефективності системи у динамічному середовищі медичних технологій.

Система спроможна працювати в режимі реального часу, що означає забезпечення майже миттєвої передачі, обробки та представлення даних. Цей аспект має принципове значення, оскільки оперативність реакції є важливою в контексті моніторингу стану здоров'я. У клінічних та повсякденних сценаріях, пов'язаних з фізіологічними показниками, кожна частка секунди може відігравати вирішальну роль у своєчасному виявленні відхилень та прийнятті адекватних медичних заходів. Наприклад, швидка ідентифікація аритмії або значних коливань рівня глюкози в крові може запобігти серйозним ускладненням або навіть врятувати життя. Для досягнення такої оперативності, архітектура системи оптимізована на всіх рівнях – від швидкісного збору даних сенсорами та їх первинної обробки мікроконтролером до ефективної мережевої передачі через MQTT-брокер та миттєвого відображення інформації у

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

користувацькому веб-додатку. Миттєві сповіщення про виявлені аномалії та швидке візуальне відображення динамічних змін у фізіологічних параметрах дозволяють користувачу або медичному персоналу своєчасно ініціювати необхідні дії, будь то звернення за професійною медичною допомогою чи корекція режиму. Це не тільки підвищує загальну ефективність системи як інструменту профілактики та ранньої діагностики, але й суттєво поліпшує потенційні результати для здоров'я, забезпечуючи проактивне управління станом людини. Таким чином, фокус на реальному часі перетворює систему на дієвий інструмент для активного моніторингу та підтримки добробуту користувача.

## 2.2 Апаратне забезпечення та локальний інтерфейс

Апаратний блок є невід'ємним компонентом архітектури системи, що виконує функцію збору вихідних даних. Його функціональність можна метафорично порівняти з сенсорно-виконавчими елементами біологічної системи, що забезпечують первинне сприйняття інформації та її передачу для подальшої обробки. Цей рівень є основою, на якій формується вся подальша логіка функціонування, включаючи аналіз, інтерпретацію та трансфер зібраних відомостей. Центральною ланкою в цій структурі виступає мікроконтролер ESP32, який відіграє роль не лише інтегруючого елемента для прийому різноманітних сигналів від сенсорів, але й здійснює їх первинну обробку. Крім того, він відповідає за динамічне управління периферійними пристроями, такими як сенсорні модулі та інтерфейсні дисплеї, забезпечуючи їх коректну роботу та взаємодію. Суттєвою особливістю є його здатність до ефективною та надійною комунікації з мережею, що розширює функціональні можливості системи до віддаленого моніторингу та управління. Таким чином, ESP32 функціонує як основний координаційний центр, що об'єднує та синхронізує дії всіх компонентів апаратного забезпечення.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з архітектурних переваг мікроконтролера ESP32 є його двоядерна структура, яка забезпечує можливість паралельного виконання декількох обчислювальних процесів без значного зниження системної продуктивності. Така конфігурація дозволяє ефективно розподіляти ресурси: одне процесорне ядро може бути задіяне для виконання інтенсивних обчислень та складних алгоритмів обробки сенсорних даних, тоді як інше ядро присвячується підтриманню стабільного та безперервного мережевого зв'язку. Цей підхід до паралелізації завдань застосовують для застосувань, що вимагають обробки інформації в реальному часі, оскільки він дозволяє суттєво мінімізувати потенційні затримки (латентність), які могли б негативно вплинути на функціональність системи. Крім того, інтеграція модулів бездротового зв'язку, таких як Wi-Fi та Bluetooth, безпосередньо в кристал мікроконтролера, є значною інженерною перевагою. Це усуває потребу у зовнішніх комунікаційних компонентах, що, у свою чергу, призводить до спрощення загальної апаратної архітектури, зменшення фізичних розмірів пристрою та зниження витрат на його виробництво. Така інтеграція також сприяє підвищенню надійності системи завдяки скороченню кількості інтерфейсів та потенційних точок відмови.

Для моніторингу фізіологічних показників використовується спеціалізована сенсорна підсистема, що включає високочутливі датчики, розроблені для специфічних вимірювань. Зокрема, оптичні сенсори, що базуються на принципах фотоплетизмографії (ФПГ) використовуються для визначення частоти серцевих скорочень (пульсу) та рівня насичення крові киснем (SpO<sub>2</sub>). Метод полягає у випромінюванні світла певної довжини хвилі у біологічні тканини, наприклад, шкіру, з подальшим аналізом інтенсивності відбитого або поглинутого світла. Головним аспектом цього методу є те, що оксигенований та деоксигенований гемоглобін демонструють різні спектри поглинання світла. Зокрема, оксигемоглобін поглинає менше червоного світла і більше інфрачервоного, тоді як дезоксигемоглобін поглинає більше червоного світла. Варіації об'єму крові в судинах, спричинені серцевими скороченнями,

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводять до циклічних змін у поглинанні світла, які реєструються сенсором як коливання електричного сигналу. Аналіз цих коливань дозволяє точно розрахувати пульс. Співвідношення поглинання світла на двох різних довжинах хвиль (зазвичай червоного та інфрачервоного) дає змогу визначити відносний рівень насичення киснем. Ця неінвазивна методика забезпечує оперативне виявлення відхилень від нормативних значень, що потенційно може свідчити про функціональні порушення серцево-судинної або дихальної системи, та забезпечує своєчасну діагностику та втручання.

Визначення температури тіла здійснюється за допомогою сучасних цифрових датчиків, які характеризуються високим рівнем точності та відмінною стабільністю вимірювань протягом тривалого часу. На відміну від аналогових рішень, де вимірювана фізична величина спершу перетворюється в аналоговий електричний сигнал, а потім потребує аналогово-цифрового перетворення (АЦП), цифрові датчики температури прямо формують цифровий вихідний сигнал. Цей підхід спрощує етап подальшої обробки даних, оскільки усуває необхідність в складних схемах АЦП та калібруванні, які часто є джерелом додаткових похибок, спричинених шумами, дрейфом компонентів або температурною нестабільністю. Пряме цифрове перетворення також значно підвищує надійність вимірювань, забезпечуючи високу повторюваність та відтворюваність результатів. Таким чином, використання цих датчиків дозволяє не лише оперативно отримувати актуальні температурні показники, але й гарантує їхню високу достовірність, адже для медичних та моніторингових систем точність даних має першочергове значення.

Візуалізація системної інформації для користувача реалізована за допомогою рідкокристалічного дисплея (РКД), що забезпечує чітке та розбірливе відображення як текстових повідомлень, так і графічних індикаторів поточного стану. Вибір РКД зумовлений його енергоефективністю та достатньою контрастністю для більшості умов освітлення. Підключення цього дисплея до мікроконтролера виконано за допомогою послідовного інтерфейсу

I2C (Inter-Integrated Circuit). Цей двопровідний інтерфейс є стандартом де-факто для зв'язку між інтегральними схемами та периферійними пристроями у вбудованих системах. Його застосування суттєво оптимізує апаратну реалізацію, мінімізуючи кількість необхідних електричних з'єднань між компонентами, що, у свою чергу, скорочує кількість контактів на платі та кабелів. Така архітектура не тільки спрощує процес монтажу, знижуючи ймовірність помилок при збірці, але й значно зменшує фізичні розміри друкованої плати та, як наслідок, всього пристрою. Компактність та акуратність конструкції підвищують ергономіку та естетичну привабливість, що сприяє підвищенню зручності та простоти експлуатації кінцевим користувачем, оскільки зменшується візуальне та функціональне перевантаження інтерфейсу.

При проектуванні та реалізації апаратної частини критеріями вибору були надійність функціонування, концептуальна простота та значний потенціал для подальшого розширення системи. Принцип надійності забезпечує стабільну роботу пристрою в різноманітних умовах експлуатації, мінімізуючи ризики відмов. Простота архітектури сприяє не тільки легкості розробки та збирання, але й спрощує подальше технічне обслуговування та діагностику. Інженерною метою було створення гнучкої конструкції, здатної до адаптації в широкому спектрі сценаріїв застосування. Це включає можливості функціонування як у побутових умовах для персонального моніторингу, так і в більш вимогливих середовищах, таких як науково-дослідні лабораторії, клінічні спостереження або спеціалізовані промислові застосування. Завдяки модульній архітектурі, система забезпечує легку інтеграцію додаткових сенсорів або функціональних модулів. Така масштабованість є важливою для підтримки довготривалої актуальності та конкурентоспроможності розробки, дозволяючи їй еволюціонувати відповідно до нових вимог, технологічних досягнень або появи нових стандартів, таким чином продовжуючи її життєвий цикл та інвестиційну цінність.

Локальний інтерфейс користувача виступає як першочерговий механізм безпосередньої взаємодії між оператором та системою. Його основне

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призначення полягає в забезпеченні оперативного доступу до показників функціонування пристрою та отриманих даних, усуваючи при цьому необхідність у залученні допоміжного зовнішнього обладнання, такого як персональні комп'ютери або мобільні пристрої. У даній реалізації це представлено у вигляді текстового інтерфейсу, що відображається на компактному рідкокристалічному дисплеї. Цей дисплей призначений для демонстрації актуальних даних у режимі реального часу, забезпечуючи миттєву візуалізацію динамічно змінюваної інформації. Така архітектура інтерфейсу дозволяє користувачеві швидко та ефективно отримувати необхідні відомості без додаткових кроків чи складних налаштувань, що є особливо цінним у ситуаціях, де оперативність прийняття рішень має першорядне значення.

Дисплейний модуль інтегрований для відображення комплексного набору даних, що включає основні фізіологічні параметри, такі як частота серцевих скорочень (пульс), рівень насичення крові киснем (SpO<sub>2</sub>), та температура тіла. Окрім цих першочергових показників, інтерфейс надає допоміжну системну інформацію, що є важливою для розуміння операційного статусу пристрою. Це може включати індикацію поточного рівня заряду акумуляторної батареї та статус мережевого з'єднання (наприклад, активне підключення до Wi-Fi). Подібний інтегрований формат представлення інформації дозволяє користувачеві здійснити швидку та всебічну оцінку поточного стану системи без необхідності активації додаткових програмних середовищ або мобільних додатків. Така консолідована візуалізація значно підвищує зручність та загальну ефективність користування, особливо в сценаріях, де швидке реагування або негайна оцінка параметрів є життєво важливими, як, наприклад, у невідкладній медицині або моніторингу пацієнтів.

Дизайн інтерфейсу був розроблений з акцентом на простоту використання та максимальну доступність для широкого кола потенційних користувачів. Це передбачало ретельний вибір шрифтів, які є чіткими та легко читабельними, а також використання інтуїтивно зрозумілих позначень та символів. Метою такого

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підходу є мінімізація когнітивного навантаження на користувача та забезпечення безперешкодної інтерпретації відображеної інформації, незалежно від рівня його технічної компетентності або попереднього досвіду роботи з подібними пристроями. Забезпечення такої універсальності в сприйнятті даних є фактором, що сприяє широкому впровадженню системи не лише у спеціалізованих областях, але й у повсякденному житті, підвищуючи її соціальну прийнятність та практичну цінність. Це, у свою чергу, розширює потенційну аудиторію та забезпечує ефективну інтеграцію технології в різноманітні контексти використання.

Структурну схему апаратної частини системи наведено на рисунку 2.2.

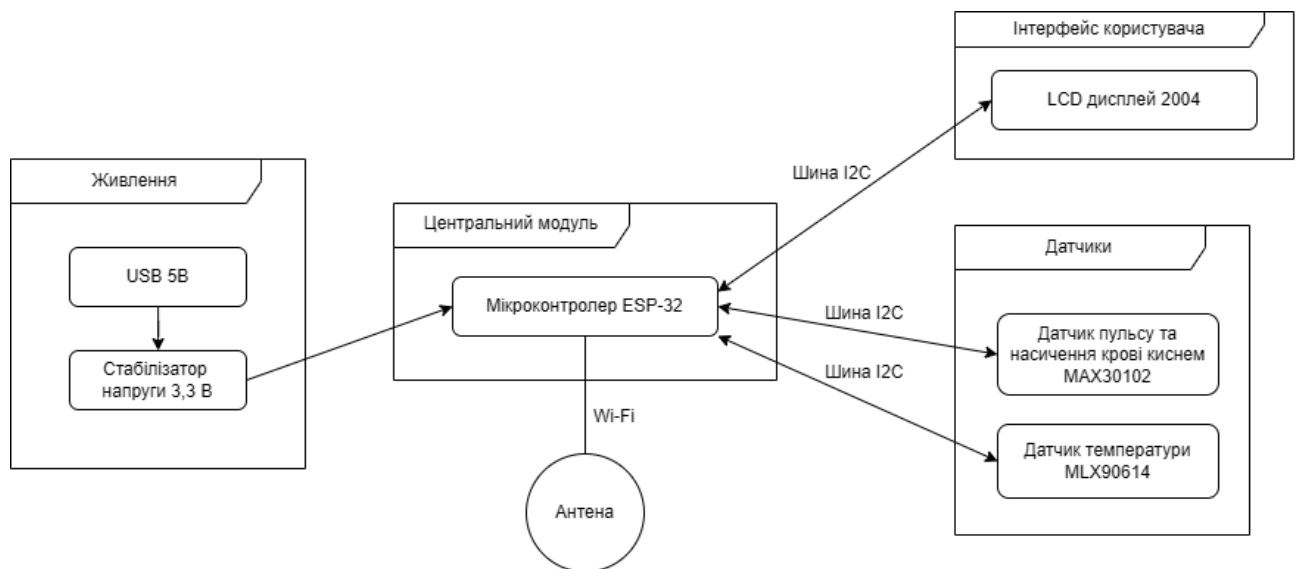


Рисунок 2.2 – Структурна схема апаратної частини

### 2.3 Алгоритми функціонування та обробка сигналів

Алгоритми можна порівняти з докладним покроковим планом, який визначає логіку роботи всієї системи, регламентуючи порядок та зміст дій для досягнення поставлених цілей. Спершу відбувається ініціалізація складових, під час якої налаштовуються порти мікроконтролера, запускаються сенсори й

встановлюються параметри зв'язку, наприклад, підключення до Wi-Fi та MQTT-брокера. Цей процес можна розглядати як підготовку до старту, що гарантує повну готовність системи до подальшої роботи.

Далі система здійснює підключення до мережі та брокера даних. У разі тимчасових збоїв зв'язку передбачені механізми повторної спроби підключення з інтервалами, що забезпечує надійність обміну інформацією і стабільність роботи навіть за нестабільного інтернет-з'єднання.

Основна операція здійснюється у циклі безперервного зчитування даних із сенсорів. Інтервали зчитування зазвичай становлять одну секунду, що забезпечує актуальність інформації. Отримані значення тимчасово зберігаються у буферах – проміжних сховищах, які дозволяють усереднювати випадкові коливання і зменшувати вплив шумів на точність обробки. Такий підхід гарантує більш надійний результат, достовірно відображаючи реальний стан об'єкта моніторингу.

Для розрахунку пульсу використовується алгоритм пошуку локальних максимумів у часовому ряду сигналів, які відповідають серцевим скороченням. Аналіз інтервалів між такими пиками дозволяє обчислити частоту серцевих ударів за хвилину. Варто враховувати, що якість визначення залежить від чистоти сигналу; на точність суттєво впливають рухи користувача та якість контакту сенсорів із шкірою, що потребує додаткової фільтрації.

Обчислення SpO<sub>2</sub> здійснюється на основі співвідношення змінної і постійної складових оптичного сигналу, отриманого з датчика. Пульсаційна складова відображає зміни об'єму крові в капілярах, а постійна – фоновий рівень відбиття. Порівняння цих параметрів, враховуючи спектральні властивості кисневої і безкисневої крові, дозволяє оцінити насичення киснем – показник, що є основним для оцінки дихальної функції та виявлення порушень.

Після обробки всі розраховані параметри одразу виводяться на екран пристрою для зручності користувача і паралельно передаються у мережу з певною періодичністю. Такий режим забезпечує баланс між оперативністю

оновлень і мінімізацією навантаження на пропускну здатність та енергоспоживання пристрою.

Завданням систем моніторингу є якісна обробка вхідних даних, які часто супроводжуються шумами, викликаними зовнішніми впливами або внутрішніми перешкодами, наприклад, рухами користувача чи електромагнітними завадами. Для підвищення точності отримані сигнали потребують ретельного очищення.

У нашій системі реалізовано механізм накопичення даних у буферах, що дозволяє аналізувати послідовності сигналів, а не окремі випадкові значення. Такий підхід сприяє визначенню динаміки параметрів і унеможливорює вплив випадкових піків або провалів.

Фільтрація здійснюється шляхом пошуку локальних максимумів і мінімумів, що надає змогу виділити суттєві коливання відповідно до фізіологічних закономірностей (наприклад, серцеві скорочення проявляються у вигляді регулярних піків). Система аналізує характерні ритмічні патерни для точного визначення параметрів.

Додатково застосовується метод усереднення, який згладжує коливання шумів шляхом обчислення середнього значення в межах буфера. Це дозволяє отримувати стабільніші та більш достовірні параметри, що віддзеркалюють реальний стан організму.

Для забезпечення коректності даних впроваджено перевірку меж можливих фізіологічних значень. Нереалістичні чи аномальні показники автоматично виключаються або коригуються, що запобігає помилковим діагнозам і підвищує довіру до системи. Блок-схему алгоритму зображено на рисунку 2.3.

Описаний алгоритм обробки даних забезпечує комплексний підхід до аналізу фізіологічних сигналів та дозволяє суттєво підвищити точність вимірювань навіть в умовах наявності зовнішніх перешкод і шумів.

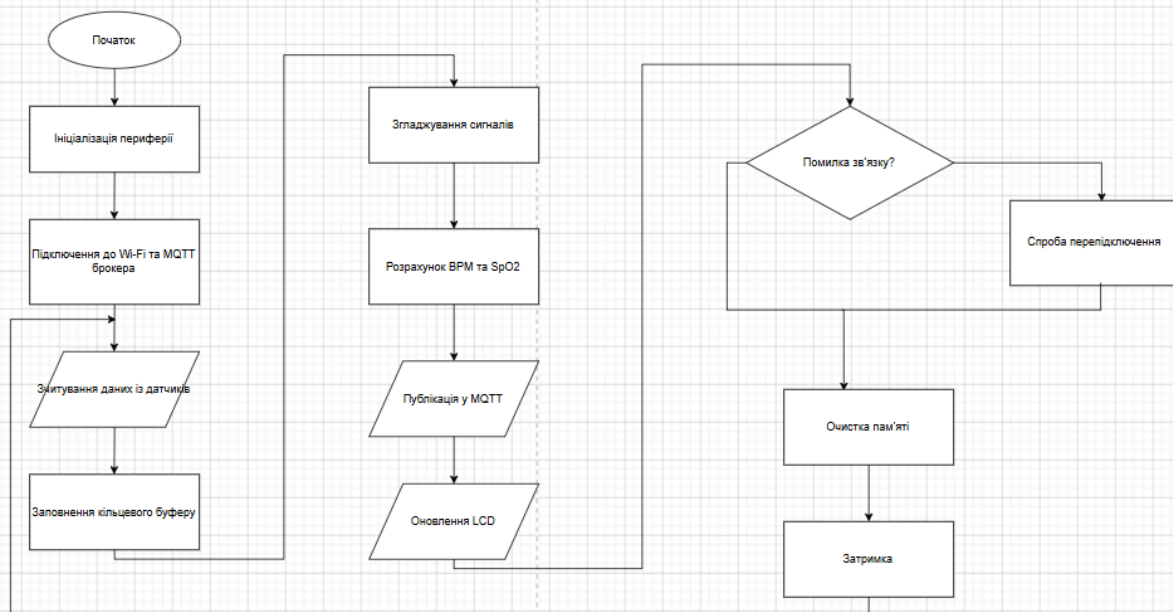


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму роботи мікроконтролера

Цей комплексний підхід до обробки і фільтрації даних суттєво підвищує якість інформації для подальшого аналізу.

#### 2.4 Мережева взаємодія, протоколи та безпека

Організація комунікації між складовими системи заснована на протоколі MQTT, обраного за його оптимізацію для пристроїв з обмеженими ресурсами і потреби економного використання мережевого трафіку. MQTT реалізує модель публікації і підписки (publish/subscribe), де пристрої-видавці даних публікують повідомлення, не обізнані про існування безпосередніх отримувачів, а абоненти автоматично отримують інформацію за вибраними темами. Така модель підвищує гнучкість та масштабованість системи, полегшує взаємодію компонентів без їхньої жорсткої залежності.

Передавані дані мають чітко визначену структуру, яка забезпечує однозначність інтерпретації інформації. Кожне повідомлення містить набір

параметрів – пульс, SpO<sub>2</sub>, температуру, часову мітку, що забезпечує своєчасне та точне відображення стану користувача у відповідних клієнтських додатках. Така організація даних сприяє швидкому аналізу та візуалізації інформації.

Використання MQTT суттєво знижує мережевий трафік і енергоспоживання, що забезпечує надійну доставку повідомлень навіть у разі непостійного з'єднання. Це робить протокол оптимальним вибором для розробки надійної системи моніторингу здоров'я.

Конфіденційність, цілісність і контроль доступу до даних – основні принципи, що повинні бути гарантовані для захисту користувачів від несанкціонованого доступу чи витоку інформації.

У базовій реалізації використовується «відкритий» MQTT-брокер, що полегшує розробку і тестування. Проте такий підхід не забезпечує належного рівня захисту, оскільки може дозволяти доступ третіх сторін до переданих даних. В майбутніх версіях системи передбачено використання механізмів автентифікації та шифрування, які обмежують доступ лише до авторизованих користувачів, подібно до доступу до приватної електронної пошти через пароль.

Планується впровадження шифрування інформації, що перетворює дані у формат, недоступний без спеціального ключа, та захищених транспортних протоколів із вбудованими алгоритмами перевірки цілісності і автентифікації. Це суттєво підвищить рівень безпеки, що є необхідним для збереження довіри користувачів і відповідності сучасним стандартам захисту персональних даних.

Веб-додаток є інтегральною складовою системи, що забезпечує користувача зрозумілим інтерфейсом для перегляду та аналізу зібраної інформації. Його роль полягає у трансформації технічних параметрів у візуально доступні та інтуїтивні для сприйняття дані.

Отримання інформації здійснюється за допомогою підписки на MQTT-топіки, що дозволяє додатку своєчасно отримувати оновлення без надмірних звернень до сервера. Такий підхід (рисунок 2.4) схожий на підписку на розсилки,

коли нова інформація надходить автоматично у момент появи, забезпечуючи оперативність і зменшуючи навантаження на мережу.

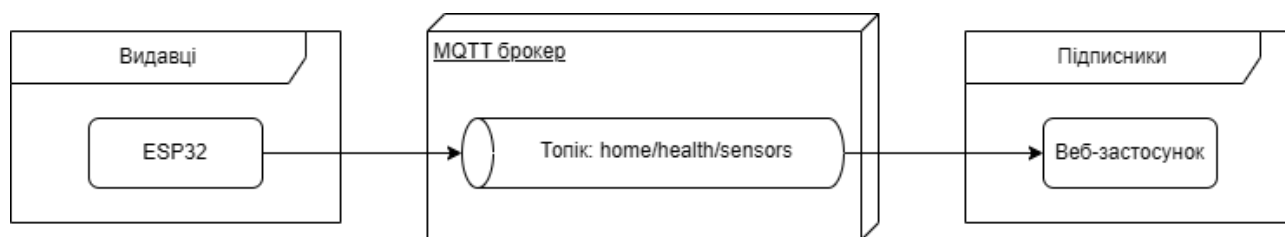


Рисунок 2.4 – Схема обміну повідомленнями за протоколом MQTT

Інтерфейс орієнтований на зручність. Дані подаються як у числовому вигляді, так і у формі графіків, що надають змогу швидко оцінити тенденції, виявити аномалії та контролювати прогрес. Така візуалізація полегшує розуміння і прийняття обґрунтованих рішень користувачем.

## 2.5 Аналіз характеристик та оцінка точності системи

Електронні системи моніторингу, особливо працюючі із біомедичними даними стабільно функціонувати в умовах виникнення зовнішніх чи внутрішніх збоїв. Адже про точність оцінки стану здоров'я безпосередньо залежить якість та безперервність отримуваних даних. Ненадійні чи перервані вимірювання можуть стати причиною хибних висновків і неправильних рішень, що часто неприпустимо.

Надійність системи забезпечується на кількох рівнях. На апаратному рівні продумано якісне підключення компонентів, стабільне живлення та перевірені комунікаційні канали. ESP32 включає вбудовані механізми відновлення роботи – у разі збоїв він може автоматично перезавантажитися, що запобігає тривалим простоям і підвищує стійкість.

На програмному рівні впроваджено обробку винятків і помилок, які можуть виникати під час роботи, зокрема при втраті зв'язку з MQTT-брокером

або інтернетом. Система не зупиняється, а переходить у режим повторних спроб відновлення зв'язку з регулярною періодичністю, забезпечуючи майже безперервний моніторинг навіть в умовах нестабільних мережесередовищ.

Особливу увагу приділено контролю якості отриманих даних. У разі виявлення нереалістичних показників (наприклад, аномально високого пульсу) система застосовує фільтрацію та апроксимацію, наприклад, замінюючи хибні значення на середні попередні, що мінімізує вплив випадкових шумів на підсумковий результат.

Такий багаторівневий підхід до забезпечення надійності дозволяє говорити про дотримання високих стандартів працездатності, що є важливою вимогою для систем моніторингу здоров'я.

Будь-яка система вимірювання піддається похибкам, що виникають унаслідок різних факторів. Для систем моніторингу здоров'я точність набуває особливого значення, оскільки від неї залежить достовірність висновків і безпека користувача. Неточні дані можуть призводити до хибних діагнозів або неправильних рішень, що є неприйнятним.

Основні джерела похибок – це шум у сигналі, викликаний електромагнітними перешкодами, а також вплив зовнішніх умов, таких як рухи користувача чи неправильне розташування датчиків. Наприклад, при оптичному вимірюванні пульсу навіть незначний зсув сенсора або рух пальця може спотворити результати. Це порівнюється з читанням тексту при поганому освітленні або рухомому об'єкті – точність стає низькою.

Для мінімізації подібного впливу використовуються описані вище буфери, фільтрація і згладжування даних, а також перевірка діапазонів фізично можливих значень. Такий підхід забезпечує достатній рівень точності для повсякденного моніторингу стану здоров'я, що робить систему придатною для загального використання, зокрема в спортивних і навчальних цілях.

Водночас слід підкреслити, що система не призначена для медичної діагностики і не має відповідної сертифікації. Для клінічного застосування

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потрібне більш точне обладнання з кваліфікованою підтримкою. Система розглядається як демонстраційний та навчальний інструмент з припустимим рівнем похибок, який слід враховувати при інтерпретації результатів.

Енергоефективність є характеристикою для автономних вбудованих систем, що працюють на батареях. Хоча в рамках цієї роботи не ставилася мета абсолютного мінімізації споживання енергії, цей аспект визначає перспективи подальшого розвитку системи.

ESP32 підтримує кілька режимів енергозбереження, що дозволяє знижувати споживання енергії у періоди простою без втрати функціональності. Використання сплячих режимів може значно продовжити час роботи від одного заряду, що є важливим для портативних застосувань.

Оптимізація програмних алгоритмів також сприяє зменшенню енергоспоживання. Регулювання частоти передачі даних, оптимізація обчислень і акуратне планування роботи процесора дозволяють знизити навантаження й економити заряд батарей. Це подібно до керування швидкістю у транспорті для підвищення економічності. Такий підхід забезпечує баланс між продуктивністю системи і тривалістю її автономної роботи.

## 2.6 Оцінка проєктного рішення та перспективи розвитку

Розроблена система відзначається рядом суттєвих переваг, що робить її корисною та перспективною для різноманітних застосувань. Зокрема, її доступність полягає у відсутності потреби в складному обладнанні чи спеціальних знаннях, спрощуючи впровадження. Гнучкість реалізації та можливість налаштування дозволяють адаптувати систему до конкретних потреб, а інтеграція з існуючими системами розширює функціональні межі. Здатність відображати показники у режимі реального часу забезпечує оперативну оцінку стану та вчасну реакцію.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Водночас система має певні обмеження. Використання симульованих даних для тестування, хоча й зручно, не повністю відображає реальні умови застосування, подібно до тренування на штучному об'єкті замість реального пацієнта. Залежність від стабільного інтернет-з'єднання обмежує придатність у регіонах із нестабільним покриттям. Точність вимірювань порівняно з професійним медичним обладнанням є обмеженою, що знижує функціональність системи для клінічного застосування, однак залишається достатньою для навчання, демонстрації та персонального спостереження.

Ці аспекти слід враховувати при використанні та подальшому розвитку системи, оскільки вони визначають межі її застосування і вказують напрямки удосконалення.

Розроблена система створена з перспективою подальшого розвитку, що забезпечує її здатність ефективно масштабуватися і адаптуватися до різних сценаріїв застосування. Масштабованість є важливою характеристикою, що дозволяє враховувати зростання вимог, технологічний прогрес і різноманітність потреб користувачів.

Одним із напрямів розширення є інтеграція додаткових сенсорів завдяки застосуванню стандартизованих інтерфейсів підключення, що дозволяє легко додавати нові вимірювальні модулі без значної переробки системи. Наприклад, передбачена можливість підключення датчиків артеріального тиску або інших біометричних параметрів, що значно розширить інформаційний спектр.

Програмна частина системи, зокрема веб-додаток, також має потенціал для вдосконалення. Планується впровадження розширених аналітичних інструментів, включаючи історичний аналіз даних, деталізовані графіки динаміки параметрів та автоматичне формування звітів. Можлива інтеграція з іншими платформами для здоров'я або спортивними додатками, що розширить функціонал і підвищить користь для кінцевого користувача.

Інфраструктура мережі може бути також оновлена шляхом розгортання власного MQTT-брокера для підвищення безпеки та контролю, а також інтеграції

хмарних сервісів, що відкриває можливості для зберігання великих обсягів даних, глобального доступу і складного аналітичного опрацювання.

Отже, проєктований комплекс має значні перспективи для розвитку, що робить його базою для подальших досліджень і впроваджень у різних сферах.

Розроблена система являє собою інтегроване рішення, в якому апаратні і програмні компоненти функціонують як єдине ціле для ефективного моніторингу фізіологічного стану людини. Вона ілюструє застосування сучасних технологій для створення «інтелектуальних систем», що збирають, аналізують і надають користувачу цінну інформацію про здоров'я.

Серед переваг – низька складність у використанні, доступність, висока гнучкість і масштабованість. Система легко адаптується під різні потреби, може розширюватись новими функціями, що робить її потужною платформою для подальших досліджень у галузі IoT та медичних технологій.

Разом із тим, система має обмеження, насамперед у точності вимірювань, залежності від стабільності інтернет-з'єднання та базовому рівні безпеки. Ці аспекти слід враховувати як виклики для вдосконалення, а не як недоліки.

Загалом можна констатувати, що розробка заклала міцну базу для повноцінної реалізації та подальшого вдосконалення системи.

## 2.7 Висновки до другого розділу

У другому розділі здійснено комплексне проєктування системи моніторингу стану здоров'я, що базується на використанні мікроконтролера ESP32 та технологій Інтернету речей (IoT). Проведено ґрунтовний аналіз предметної області, який підтвердив потребу в автономних засобах постійного відстеження фізіологічних показників для переходу від реактивного лікування до проактивного управління здоров'ям. На основі виявлених недоліків комерційних гаджетів, таких як закритість програмного забезпечення та висока вартість, обґрунтовано вибір платформи з відкритою архітектурою, що

забезпечує гнучкість налаштувань та можливість адаптації алгоритмів під конкретні дослідницькі завдання.

Розроблена багаторівнева архітектура дозволяє ефективно розподілити функції між апаратною частиною, мережевою підсистемою та клієнтським веб-додатком. Використання модульного підходу до побудови структури гарантує взаємозамінність компонентів, що дає змогу оновлювати окремі сенсори або програмні модулі без порушення цілісності всієї системи. Особливу увагу приділено забезпеченню роботи в реальному часі, що мінімізує затримки при передачі даних та дозволяє користувачеві миттєво отримувати інформацію про відхилення у показниках організму.

Апаратна реалізація пристрою базується на обчислювальних можливостях двоядерного мікроконтролера ESP32, що дозволяє паралельно виконувати складні розрахунки та підтримувати стабільне бездротове з'єднання. До складу сенсорної підсистеми включено оптичні датчики для вимірювання пульсу та сатурації кисню, а також прецизійні цифрові термометри для контролю температури тіла. Наявність локального інтерфейсу у вигляді рідкокристалічного дисплея, підключеного через інтерфейс I2C, забезпечує автономність використання пристрою та можливість оперативного перегляду даних без доступу до зовнішніх мереж.

Проведений аналіз показав, що розроблена система відповідає вимогам до засобів побутового моніторингу, поєднуючи енергоефективність із високим потенціалом до масштабування. Сформоване проєктне рішення дозволяє в майбутньому інтегрувати нові типи сенсорів, хмарні сервіси для аналізу даних та вдосконалені механізми шифрування для захисту конфіденційної інформації користувача. Отримані результати створюють необхідний теоретичну та технічну основу для переходу до етапу практичного створення прототипу та його всебічного тестування у реальних умовах.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатково було враховано можливість подальшої оптимізації програмного забезпечення системи шляхом використання алгоритмів цифрової фільтрації та статистичного аналізу отриманих сигналів.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

### 3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ

#### 3.1 Реалізація апаратної та програмної складових системи

Процес впровадження системи моніторингу стану здоров'я є фінальною та, водночас, однією з найбільш відповідальних і методологічно складних фаз у циклі розробки інженерних рішень. На цьому етапі відбувається не просто технічне об'єднання компонентів, а й їхня комплексна верифікація та валідація, що дозволяє емпірично підтвердити або скоригувати гіпотези, закладені в архітектуру та дизайн системи на попередніх стадіях. Інтеграція апаратних і програмних складових у цілісну функціональну архітектуру потребує ретельного планування та виконання, адже саме тут формується здатність системи функціонувати з високим рівнем надійності та стабільності, що є принциповим для медичних застосувань. Архітектура повинна забезпечувати безперервну та ефективну обробку значних обсягів інформації в режимі реального часу, своєчасне виявлення змін у фізіологічних показниках та прийняття обґрунтованих рішень. Відповідно, успішність цього етапу безпосередньо визначає функціональну адекватність, експлуатаційну придатність та загальну ефективність розробленої системи у подальшому її застосуванні.

Характерною особливістю цієї фази є нагальна потреба в забезпеченні когерентності та гармонізації функціонування між різнорідними компонентами, що часто демонструють істотні відмінності у своїх технічних характеристиках, швидкості обробки даних та вимогах до системних ресурсів. Наприклад, первинні апаратні сенсори, призначені для реєстрації фізіологічних параметрів, генерують вхідні сигнали, які можуть бути нерегулярними, змішуватися з шумами або характеризуватися високою волатильністю, відображаючи динамічну природу біологічних процесів. Водночас, програмні модулі, що відповідають за аналіз та інтерпретацію цих даних, вимагають високоструктурованих, послідовних та очищених вхідних потоків для

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення точності алгоритмічної обробки та прийняття коректних рішень. Ця дисперсія у вимогах та характеристиках зумовлює необхідність впровадження складних методів попередньої обробки сигналів, таких як фільтрація, згладжування, нормалізація або екстракція релевантних ознак, які конвертують необроблені дані у формат, придатний для подальшого аналізу. Застосування ефективних механізмів синхронізації потоків інформації дозволяє усунути часові розбіжності та забезпечити цілісність, консистентність і надійність даних, запобігаючи втратам або спотворенням інформації, що забезпечує достовірність результатів моніторингу.

На етапі реалізації значна увага приділяється також формуванню відмовостійкості та робастності системи в умовах потенційних зовнішніх і внутрішніх викликів, які можуть суттєво вплинути на її функціонування. До таких дестабілізуючих факторів належать не лише нестабільність джерел живлення, що є поширеною проблемою в різноманітних експлуатаційних середовищах, але й перебої у функціонуванні мережевих з'єднань, які можуть призвести до втрати даних або порушення комунікації між розподіленими компонентами. Також слід враховувати можливість виникнення непередбачених помилок у програмному забезпеченні, які часто виявляються лише під час інтенсивної експлуатації. Зважаючи на ці потенційні загрози, на даній стадії розробки інтегруються та тестуються комплексні механізми, які гарантують здатність системи адаптивно та адекватно реагувати на аварійні ситуації. Це може включати реалізацію стратегій "м'якої деградації", коли система зберігає часткову функціональність замість повного відмови, а також розробку ефективних протоколів автоматичного відновлення після збоїв, що передбачають перевірку цілісності даних, повернення до останнього стабільного стану або перезапуск модулів. Такий підхід мінімізує час простою та забезпечує безперервність моніторингу у медичних додатках, де відмовостійкість може мати вирішальне значення.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На етапі реалізації застосовується поетапний методологічний підхід, який передбачає поступове формування системи, а не одномоментне її створення у фінальному, завершеному вигляді. Цей ітеративний процес починається з розробки та ретельного тестування окремих функціональних модулів або компонентів у ізольованому середовищі. Такий підхід до модульного тестування суттєво знижує загальну складність процесу налагодження, дозволяючи локалізувати потенційні дефекти на ранніх стадіях їх виникнення та мінімізувати кількість помилок, які могли б виявитися на пізніших етапах інтеграції. Лише після успішного підтвердження функціональної коректності та надійності кожного окремого модуля, відбувається їх поступова інтеграція до цілісної системної архітектури. Ця стратегія, часто іменована як "збірка знизу вгору" або інкрементальна інтеграція, не тільки сприяє значно глибшому та систематичному контролю якості на кожному кроці розробки, але й підвищує адаптивність системи до можливих змін вимог або виявлення нових викликів. Вона також забезпечує більшу гнучкість у внесенні модифікацій та оптимізації без необхідності повного перепроєктування всієї архітектури, що є цінним у динамічних проєктах.

Після успішного завершення всіх окремих підетапів реалізації, включно з інтеграцією та початковим системним тестуванням, отримується функціонально працездатна та комплексна система, яка, тим не менш, не готова до негайного повномасштабного впровадження. На цьому етапі вона підлягає ретельному та багатоаспектному подальшому тестуванню, що включає валідацію її продуктивності під навантаженням, перевірку на відповідність вимогам безпеки, а також оцінку її зручності та ефективності для кінцевих користувачів. Таке тестування, часто здійснюване у симульованих або контрольованих експлуатаційних умовах дозволяє виявити приховані недоліки та оптимізувати систему перед її повноцінним розгортанням. Лише після підтвердження її відповідності всім експлуатаційним критеріям та стандартам, система може бути поетапно впроваджена у реальну експлуатацію, починаючи, можливо, з пілотних

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проектів для остаточної перевірки в реальному середовищі та подальшого масштабування для широкого застосування. Цей заключний етап гарантує, що система буде не тільки технічно справною, але й ефективною та надійною у практичному застосуванні протягом усього свого життєвого циклу.

Апаратна частина (рисунок 3.1) в системі слугує основою, без якої неможливе отримання первинних даних з зовнішнього середовища, що визначає точність вимірювань, стабільність функціонування та загальну ефективність системи. Від правильності конструювання і інтеграції апаратних компонентів залежить, наскільки водночас надійною і чутливою буде система.

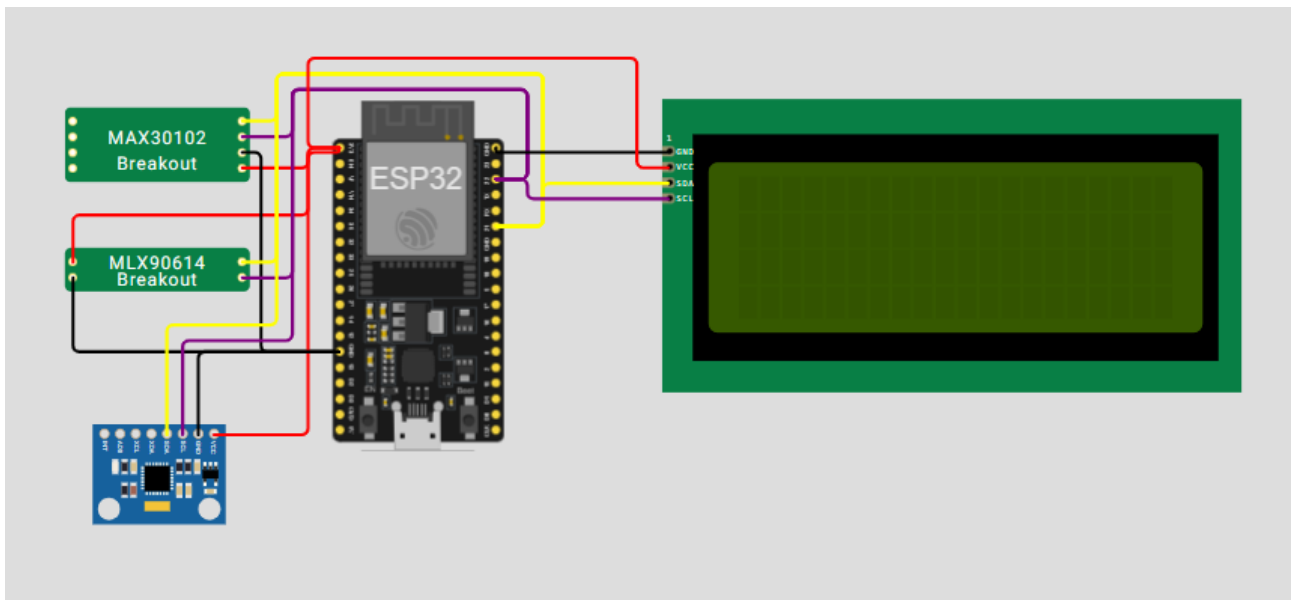


Рисунок 3.1 – Апаратна реалізація системи у середовищі Wokwi

У ході реалізації будь-якої складної технічної системи значну, навіть першорядну увагу приділяють коректному та надійному з'єднанню окремих елементів, що забезпечує її функціональність. Цей процес вимагає глибокого розуміння та ретельного врахування їхньої специфічної технічної специфікації, яка охоплює електричні, механічні та інколи термічні параметри. Наприклад, для сенсорів часто виникає потреба не лише в певному стабільному рівні напруги живлення, але й у відповідності до жорстких вимог щодо якості цього живлення, зокрема мінімізації пульсацій та електричних шумів, що прямо впливає на

точність та чистоту сигналу. Окрім цього, можуть бути спеціальні умови підключення, такі як узгодження імпедансів для високочастотних сигналів, правильне заземлення для уникнення контурів струму та відповідність протоколам передачі даних з чіткими часовими параметрами, які впливають на їхню працездатність та довговічність. Недотримання цих вимог, навіть незначне, може призвести не тільки до суттєвого зниження якості вимірювань, виявляючись у збільшенні похибок або шумів, але й до незворотного пошкодження дороговартісного обладнання, що, своєю чергою, тягне за собою значні фінансові та часові витрати на ремонт або заміну, а також може спричинити збій всієї системи. Таким чином, ретельне інженерне опрацювання на етапі з'єднання є запорукою системної стабільності.

Водночас, вирішальну роль відіграє архітектурна організація інтерфейсів, які забезпечують безперебійний та ефективний зв'язок між різними апаратними блоками системи. Систематичне використання загальноновизнаних стандартних протоколів і інтерфейсів, таких як I2C, SPI, UART, або ж більш складних мережевих рішень на базі Ethernet, приносить численні переваги. По-перше, такий підхід істотно послаблює складність монтажу та інтеграції компонентів, що значно прискорює процес розробки та зменшує вірогідність виникнення помилок. По-друге, стандартизація значно сприяє більшій взаємозамінності окремих модулів, що спрощує логістику постачання, оптимізує процеси технічного обслуговування та ремонту, дозволяючи швидше замінювати несправні елементи без значних переналаштувань. По-третє, застосування стандартних інтерфейсів надає широкі можливості для подальшого гнучкого розширення комплексу або модернізації його функціональних можливостей без необхідності внесення значних, структурних змін у базову архітектуру системи. Це забезпечує її майбутню адаптивність та довговічність в умовах постійного технологічного розвитку.

Окрім цього, необхідно ретельно враховувати фізичне розміщення всіх компонентів системи, оскільки воно має безпосередній, часто вплив на якість

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

отримуваних даних та загальну надійність функціонування. Неправильне позиціонування сенсорів або інших чутливих елементів може призвести до істотних спотворень вимірювань, спричинених впливом різноманітних зовнішніх факторів. До таких факторів належать електромагнітні шуми та перешкоди, які можуть індукувати небажані сигнали в ланцюгах, механічні вібрації, що передаються від навколишнього середовища або інших частин системи та можуть спотворювати показання датчиків руху або положення, а також значні температурні коливання, що можуть спричинити дрейф сенсорів або вихід компонентів за межі їхнього робочого діапазону. Саме тому під час реалізації проекту інженери прагнуть забезпечити максимально оптимальні умови експлуатації та встановлення апаратних складових. Це включає використання екранування для захисту від електромагнітних завад, застосування антивібраційних платформ або демпферів, ефективне управління тепловими режимами за допомогою систем охолодження чи відповідного розташування елементів для належної вентиляції, а також вибір місць, які мінімізують вплив інших потенційно деструктивних чинників. Такий системний підхід до фізичного розміщення є запорукою отримання достовірних та точних даних.

Процес реалізації апаратної частини нерозривно пов'язаний також із багатоетапним та ретельно спланованим тестуванням, що є невід'ємною складовою забезпечення високої якості та надійності системи. Метою такого систематичного тестування є завчасне виявлення будь-яких можливих дефектів, які можуть виникнути на фізичному рівні, перш ніж система буде повністю інтегрована. Це можуть бути як очевидні, так і приховані проблеми, наприклад, ненадійні контакти в електричних з'єднаннях, що можуть призвести до періодичних збоїв або некоректної передачі даних, або ж більш серйозні несправності окремих вузлів та мікросхем, які можуть повністю вивести з ладу певну функціональність. Проведення таких перевірок на ранніх етапах, включно з функціональним тестуванням, тестуванням під навантаженням та перевіркою відповідності специфікаціям, дозволяє оперативно ідентифікувати та усунути

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виявлені проблеми. Цей проактивний підхід значно спрощує подальше налагодження системи, мінімізуючи складність виокремлення апаратних проблем від потенційних програмних помилок на пізніших стадіях інтеграції. Таким чином, багатоетапне тестування апаратних компонентів формує міцну та стабільну основу для подальшої розробки програмного забезпечення.

У контексті створення будь-якої складної технічної системи, реалізація її апаратної складової виступає не просто як один з етапів. Від її якісного виконання та бездоганної функціональності суттєво залежить не тільки подальша загальна ефективність, але й довгострокова надійність роботи всієї системи в цілому. Без міцної, правильно спроектованої та ретельно реалізованої апаратної основи, навіть найпродуманіше та найскладніше програмне забезпечення не зможе повною мірою розкрити свій потенціал, оскільки буде обмежене фізичними недоліками або непередбачуваними збоями на рівні «заліза».

Програмний компонент системи, як інтелектуальне ядро, відповідає за координоване керування всіма складними процесами збору, обробки та передачі даних, що є абсолютно необхідним для забезпечення злагодженої та синхронізованої роботи всіх без винятку складових, як апаратних, так і програмних, а також для ефективного та своєчасного виконання всіх поставлених завдань. З архітектурної точки зору, програмна частина, як правило, структурно складається з кількох взаємозалежних, чітко розмежованих модулів, кожен з яких реалізує певний функціональний аспект системи. Така модульна організація не лише підвищує гнучкість розробки та зручність обслуговування, а й сприяє підвищенню надійності системи за рахунок чіткого розмежування відповідальності та спрощення тестування кожного компонента окремо. Кожен модуль, від контролю периферійних пристроїв до складних алгоритмів обробки даних, працює у синергії з іншими для досягнення загальних цілей системи.

Перший етап роботи з програмним забезпеченням передбачає комплексну ініціалізацію всіх задіяних апаратних і програмних елементів системи. Цей

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

включає низку послідовних кроків. Зокрема, відбувається конфігурація параметрів мікроконтролера, що охоплює налаштування тактових частот, портів введення/виведення, таймерів та інших периферійних пристроїв. Одночасно здійснюється верифікація доступності та працездатності сенсорів, що передбачає перевірку їхнього підключення та відповіді. Також встановлюються та перевіряються мережеві з'єднання, що є основою для подальшої передачі даних. Система здатна адекватно реагувати на будь-які помилки або виняткові ситуації, що можуть виникнути на цьому етапі. Ефективна обробка помилок, включаючи механізми відновлення або оповіщення, є запорукою забезпечення стабільності та безперервності подальшої роботи системи, мінімізуючи ризики збоїв на початкових етапах.

Основна логіка роботи системи концентрується та реалізується у безперервному операційному циклі, який спроектований таким чином, щоб забезпечувати безперервне та стабільне виконання функцій системи. Цей цикл є серцем програмного забезпечення та охоплює послідовну низку важливих операцій. Він починається зі систематичного збору даних із усіх задіяних сенсорів, забезпечуючи актуальність інформації. Далі отримані дані піддаються обробці, яка може включати первинний аналіз, фільтрацію або нормалізацію. Після обробки інформація надсилається далі для зберігання, візуалізації або використання іншими компонентами системи. Вимогою для багатьох додатків є те, що всі ці операції – збір, обробка та надсилання – мають виконуватись із мінімальним можливим рівнем затримки. Дотримання цієї умови є абсолютно необхідним для підтримки ефективного режиму роботи у реальному часі, що дозволяє системі швидко реагувати на зміни у зовнішньому середовищі та забезпечувати своєчасне прийняття рішень або управління процесами.

Обробка даних у сучасних системах виходить далеко за межі простого перетворення вимірних значень; вона охоплює комплекс більш складних, багатоетапних процедур. Серед таких процедур, які спрямовані на очищення та уточнення даних, можна виділити фільтрацію шумів, що дозволяє усунути

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випадкові або систематичні небажані сигнали, які можуть спотворювати справжнє значення. Сюди також відноситься згладжування сигналів, яке допомагає виявити базові тенденції та патерни у даних, мінімізуючи вплив короткочасних коливань. Крім того, невід'ємною частиною є корекція похибок, що може включати застосування калібрувальних коефіцієнтів, компенсацію температурних дрейфів або використання алгоритмів для виправлення систематичних спотворень. Ці методи, що ґрунтуються на математичній статистиці та теорії обробки сигналів, істотно сприяють підвищенню точності і достовірності отриманих результатів. Вони дозволяють ефективно зменшити вплив як випадкових, так і систематичних зовнішніх факторів, тим самим забезпечуючи, що дані, які використовуються для прийняття рішень, є максимально репрезентативними та надійними.

Передача обробленої інформації, що є завершальним етапом циклу обробки даних, здійснюється за допомогою ретельно підібраних мережевих протоколів, які спеціально орієнтовані на забезпечення високої надійності та максимальної ефективності комунікації в розподілених системах. Вибір конкретного протоколу залежить від специфічних вимог до швидкості, безпеки, обсягу даних та топології мережі. Однак при проектуванні та реалізації цього етапу слід постійно враховувати потенційні проблеми, що є характерними для будь-якого мережевого середовища. До таких проблем належать змінні затримки у передачі даних, які можуть впливати на відповідність системи вимогам реального часу, а також імовірність втрати пакетів, що може призвести до неповної або спотвореної інформації на стороні приймача. Для мінімізації цих ризиків інтегруються механізми контролю цілісності, повторної передачі даних, а також використання протоколів із гарантованою доставкою або з оптимізацією якості обслуговування (QoS). Таким чином, ефективне управління мережевою передачею забезпечує функціональність всієї системи.

Отже, програмна частина системи виступає не просто як набір інструкцій, а як всеохоплюючий та координуючий механізм, який виконує роль

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтелектуального диригента. Вона майстерно поєднує усі різноманітні апаратні ресурси, вдихаючи в них функціональне життя та інтегруючи їх у цілісну, злагоджено працюючу систему. Саме програмне забезпечення забезпечує не лише виконання всіх функціональних вимог, визначених на етапі проектування, але й керує логікою взаємодії між компонентами, обробкою даних та реакцією системи на зовнішні події. Це інтелектуальне ядро надає системі здатності адаптуватися до мінливих умов, навчатися та реалізовувати складні алгоритми, що перетворює набір апаратних засобів на повноцінний, ефективний та самодостатній технологічний комплекс, готовий до вирішення поставлених завдань.

### 3.2 Розробка клієнтського веб-додатку

Веб-додаток VitalSim виступає елементом верхнього рівня архітектури, виконуючи роль інтерактивного інтерфейсу користувача, через який здійснюється повний контроль за процесом моніторингу та аналіз отриманих фізіологічних показників. Головною метою розробки інтерфейсу стало створення інтуїтивно зрозумілого цифрового середовища, яке здатне трансформувати складні масиви технічних даних у доступні для сприйняття візуальні форми, такі як графіки та цифрові індикатори. Впровадження системи автентифікації користувачів на базі хмарної платформи Firebase Authentication дозволяє забезпечити персоналізацію даних та контроль доступу до конфіденційної інформації (рисунок 3.2). Завдяки цьому кожен зареєстрований користувач має унікальний ідентифікатор, за яким у системі закріплюються індивідуальні результати вимірювань. Інтеграція веб-додатку з хмарною базою даних забезпечує синхронізацію інформації у режимі реального часу, що дозволяє миттєво відображати зміни фізіологічних параметрів після надходження нових даних від апаратної частини системи.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

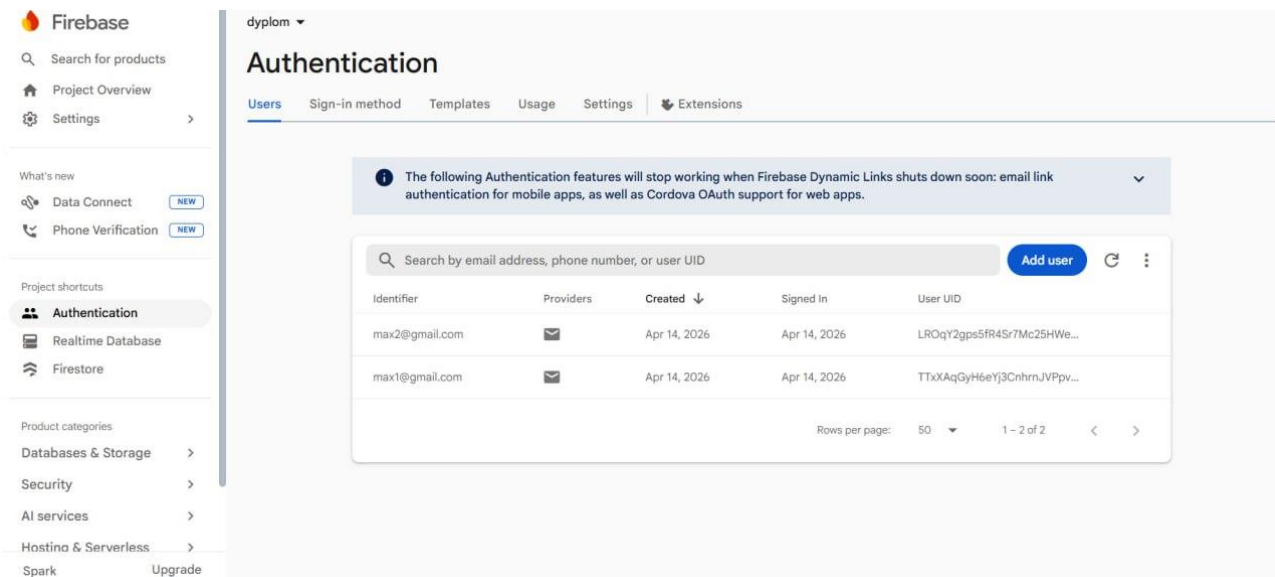


Рисунок 3.2 – Система автентифікації користувачів у Firebase Console

В основі програмної архітектури веб-додатку лежить принцип асинхронного обміну інформацією, що реалізовано через інтеграцію з хмарною базою даних Firebase Realtime Database (рисунок 3.3). Використання цієї технології дозволяє підтримувати стабільне з'єднання між апаратною частиною та інтерфейсом за моделлю «публікація/підписка», завдяки чому будь-які зміни показників, що фіксуються сенсорами на базі ESP32, миттєво відображаються у браузері без необхідності перезавантаження сторінки. Структура даних у базі організована у форматі JSON-об'єктів, де для кожного вимірювання фіксується часова мітка, значення пульсу, рівень сатурації киснем та температура тіла, що забезпечує високу швидкість обробки запитів та зручність масштабування системи при додаванні нових параметрів моніторингу. Додатково використання Firebase забезпечує автоматичну синхронізацію даних між усіма підключеними клієнтами, що особливо важливо для систем дистанційного медичного моніторингу в режимі реального часу. Завдяки застосуванню асинхронних запитів веб-додаток продовжує коректно функціонувати навіть під час активного оновлення даних, не створюючи затримок у роботі користувацького інтерфейсу.



значень виводиться інформаційне повідомлення «Немає даних» разом із чіткою інструкцією («Натисни кнопку для створення виміру»), що значно підвищує загальну надійність та зручність інтерфейсу в умовах перебоїв із мережевим з'єднанням або при першому запуску пристрою.

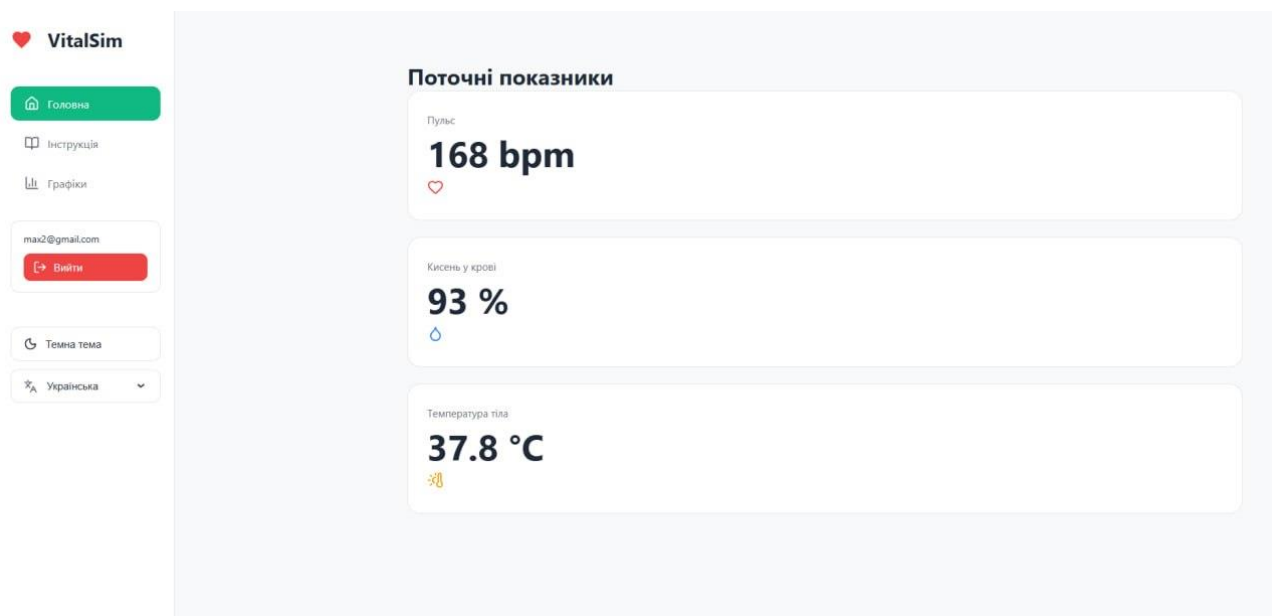


Рисунок 3.4 – Головна сторінка веб-додатку

Для глибшого аналізу стану організму розроблено спеціалізований розділ графічної аналітики (рисунок 3.5), де дані візуалізуються у вигляді динамічних часових рядів («Graphics»). Такий підхід дозволяє відстежувати динаміку змін показників, виявляти приховані аномалії та аналізувати реакцію організму на фізичні чи емоційні навантаження протягом певного періоду. Візуальний розділ додатку підтримує одночасне відображення кількох кривих, що дає змогу проводити комплексний аналіз взаємозв'язку між пульсом, температурою та рівнем насичення киснем, значно розширюючи діагностичний потенціал системи порівняно зі звичайним локальним дисплеєм пристрою. Використання інтерактивної графічної візуалізації підвищує інформативність системи та спрощує процес інтерпретації результатів для користувача.

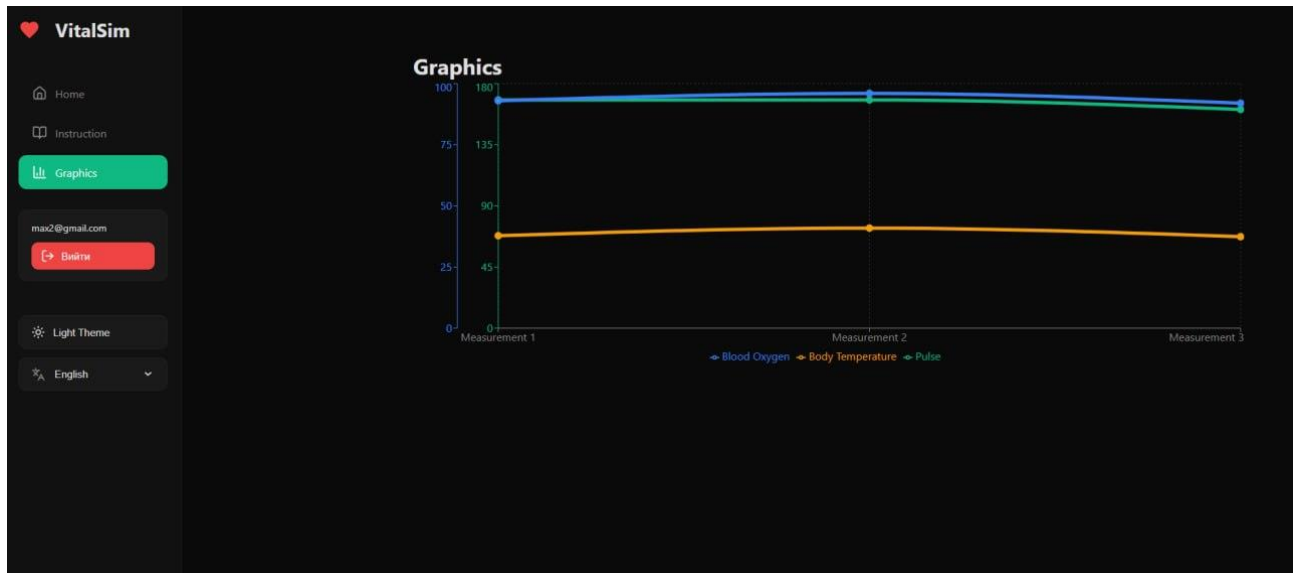


Рисунок 3.5 – Розділ графічної аналітики

Додатково при реалізації інтерфейсу було враховано потреби різноманітних груп користувачів, що виразилося у підтримці багатомовності (українська та англійська мови) та можливості вибору кольорової схеми інтерфейсу (світла та темна теми). Це не лише підвищує зручність використання додатку в різних умовах освітлення, а й сприяє ширшому розповсюдженню системи в освітньому та дослідницькому середовищах. У підсумку, створений веб-додаток виступає як повноцінний персональний асистент, що забезпечує стабільну, швидку та безпечну взаємодію людини з інтелектуальною системою моніторингу.

### 3.3 Методика та аналіз результатів експериментального тестування

Розроблена методика тестування враховує специфіку системи моніторингу і орієнтована на всебічну перевірку її основних функцій. Вона охоплює як функціональні аспекти роботи окремих модулів, так і інтегральну поведінку системи як єдиного цілого в умовах реального навантаження. Головною метою такого тестування є встановлення відповідності роботи системи встановленим вимогам і виявлення супутніх недоліків. Крім того, тестування слугує

інструментом верифікації прийнятих технічних рішень та дозволяє підтвердити або спростувати гіпотези, висунуті на етапі проектування. Таким чином, методика виконує не лише контрольну, а й аналітичну функцію в процесі розробки.

Тестування здійснюється у максимально наближених до реальних умовах експлуатації, що дозволяє отримати об'єктивні дані щодо функціонування системи в практичних сценаріях її застосування. Симуляція реальних умов включає відтворення типових навантажень, характерних для цільового середовища використання, а також моделювання можливих позаштатних ситуацій. Особлива увага приділяється аналізу роботи у різних режимах, включаючи зміни параметрів зовнішнього середовища, які можуть впливати на працездатність системи. Зокрема, досліджується поведінка системи при коливаннях температури, вологості, рівня електромагнітних завад та інших фізичних факторів. Такий підхід дає можливість оцінити стійкість системи не лише в ідеальних лабораторних умовах, а й при впливі чинників, з якими вона неминуче стикатиметься в реальній експлуатації.

Цикл тестування включає багаторазове повторення експериментів з метою оцінки стабільності і відтворюваності отриманих результатів. Кожен експеримент проводиться за строго визначеним протоколом, що забезпечує порівнюваність даних між різними ітераціями та виключає вплив випадкових змін методики на кінцеві показники. Зібрані дані піддаються детальному аналізу, що дає змогу виявити закономірності та потенційні відхилення від норми, які можуть свідчити про наявність проблем. Для цього застосовуються як статистичні методи обробки, так і порівняння з еталонними значеннями, визначеними на основі технічних вимог до системи. Результати кожного циклу тестування документуються і порівнюються з попередніми, що дозволяє відстежувати динаміку змін та оцінювати ефект від внесених коригувань.

Отримані в процесі тестування дані демонструють здатність системи стабільно виконувати свої функції, зокрема коректно зчитувати інформацію з

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сенсорів і передавати її без суттєвих затримок до блоку обробки. Система впевнено справляється з обробкою вхідних сигналів у штатному режимі, демонструючи стабільну частоту опитування датчиків та низький рівень похибки при інтерпретації отриманих значень. Вимірні показники узгоджуються з очікуваними діапазонами, що свідчить про коректність реалізації алгоритмів обробки та відповідність архітектурних рішень поставленим завданням. Часові характеристики відгуку системи на зміни вхідних параметрів відповідають заданим специфікаціям, що підтверджує ефективність реалізованих механізмів збору та передачі даних.

Протягом тестування не було зафіксовано помилок або збоїв, що призводили б до повної втрати функціональності, що свідчить про надійність і стабільність системи в цілому. Система демонструє стійку роботу при тривалому безперервному функціонуванні. Водночас спостерігалися деякі незначні відхилення у показниках, які можливо пояснити впливом зовнішніх чинників, зокрема нестабільністю живлення та наявністю фонових електромагнітних перешкод. Слід зазначити, що подібні відхилення є типовими для систем такого типу і, як правило, не впливають суттєво на їх загальну функціональність та достовірність вимірювань. Проте їх фіксація та систематизація необхідна для подальшої роботи над підвищенням точності та завадостійкості системи.

Проведений аналіз результатів дає можливість всебічно охарактеризувати ефективність розробленої системи, акцентуючи увагу на її сильних та слабких сторонах з урахуванням специфіки цільового застосування. До переваг системи належать стабільність роботи в широкому діапазоні умов, низький рівень систематичних похибок та висока відтворюваність результатів між окремими циклами вимірювань. Зібрані дані підтверджують, що система в цілому відповідає поставленим вимогам і може застосовуватись для задач моніторингу стану здоров'я в умовах реальної експлуатації. Це робить її придатною для практичного впровадження в контексті носимих медичних пристроїв та систем дистанційного спостереження за пацієнтами.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виявлені відхилення свідчать про існування потенціалу для подальшого удосконалення системи, особливо у частинах, пов'язаних з обробкою даних та підвищенням захищеності від впливу зовнішніх факторів. Перспективними напрямками розвитку є вдосконалення алгоритмів фільтрації шумів, оптимізація процедур калібрування датчиків, а також розробка додаткових механізмів самодіагностики, які дозволять системі виявляти та компенсувати нештатні стани в автономному режимі. Комплексне вирішення цих завдань дозволить суттєво підвищити точність, надійність та практичну цінність системи в довгостроковій перспективі.

### 3.4 Порівняльний аналіз, оцінка ефективності та перспективи вдосконалення

Порівняльний аналіз розробленої системи з наявними на ринку рішеннями виявляє її конкурентні переваги, серед яких особливе місце посідають висока гнучкість архітектури та відносна простота практичної реалізації.

Сучасний ринок носимих пристроїв для моніторингу здоров'я представлений широким спектром комерційних рішень – від масових споживчих гаджетів до спеціалізованого медичного обладнання, однак переважна більшість із них функціонує в межах закритих екосистем, що суттєво обмежує можливості їх адаптації та розширення. Розроблена система вигідно вирізняється на цьому тлі завдяки відкритій модульній архітектурі, яка дозволяє змінювати як апаратну конфігурацію, так і програмну логіку відповідно до конкретних потреб користувача без необхідності отримання спеціальних дозволів або доступу до закритого вихідного коду. На відміну від більшості комерційних гаджетів, ця система є повністю відкритою для подальшої програмної та апаратної модифікації, що дозволяє адаптувати її під специфічні дослідницькі чи освітні завдання без обмежень, притаманних пропріетарним продуктам. Це принципово в контексті наукових досліджень, де часто виникає потреба у швидкому внесенні

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змін до методики збору даних або алгоритмів їх інтерпретації, не покладаючись на виробника обладнання. Крім того, відкритість платформи дозволяє науковому або інженерному колективу самостійно верифікувати коректність реалізованих алгоритмів.

Порівняно з комерційними аналогами, розроблена система також демонструє суттєво нижчу вартість компонентів при збереженні прийняттого рівня функціональності, що робить її доступною для освітніх установ та незалежних дослідників з обмеженим бюджетом. Такий підхід робить розробку перспективною платформою для подальшого розвитку та впровадження нових алгоритмів обробки даних, а також для інтеграції з іншими відкритими дослідницькими інструментами та середовищами аналізу даних.

Основні критерії ефективності функціонування базуються на здатності програмно-апаратного комплексу забезпечувати стабільний моніторинг та генерувати точні й надійні результати у реальному часі. До таких критеріїв належать: стабільність частоти опитування сенсорів, точність відтворення вимірюваних фізіологічних параметрів, затримка передачі даних між апаратним модулем та програмним інтерфейсом, а також стійкість системи до тривалого безперервного функціонування без деградації показників. Оцінка відповідності системи цим критеріям здійснювалася шляхом порівняння фактично вимірених значень із встановленими специфікаціями та результатами роботи еталонних приладів у контрольованих умовах.

Результати проведеного комплексного тестування підтверджують повну відповідність системи цим вимогам, що дозволяє офіційно рекомендувати її для практичного застосування у визначених умовах експлуатації. Зокрема, система продемонструвала здатність підтримувати стабільну частоту зчитування сенсорних даних протягом усього тестового циклу, а також забезпечувати їх своєчасну передачу до блоку обробки з мінімальними відхиленнями від заданих тимчасових параметрів. Протягом експериментів система демонструвала високу надійність без фіксації програмних помилок або збоїв, що призводили б до

втрати даних чи некоректного завершення сесій моніторингу. Хоча й спостерігалися незначні відхилення показників, зумовлені впливом динамічного зовнішнього середовища, зокрема коливаннями температури, фоновими електромагнітними завадами та артефактами руху – що є цілком типовим і припустимим для вимірювальних систем такого класу. Навіть у присутності цих зовнішніх збурень система зберігала загальну функціональність та продовжувала коректно виконувати покладені на неї завдання, демонструючи достатній рівень завадостійкості для практичного застосування в неідеальних умовах. Таким чином, сукупність отриманих результатів формує переконливу доказову базу на користь практичної придатності розробленої системи для задач моніторингу фізіологічних показників у реальному часі.

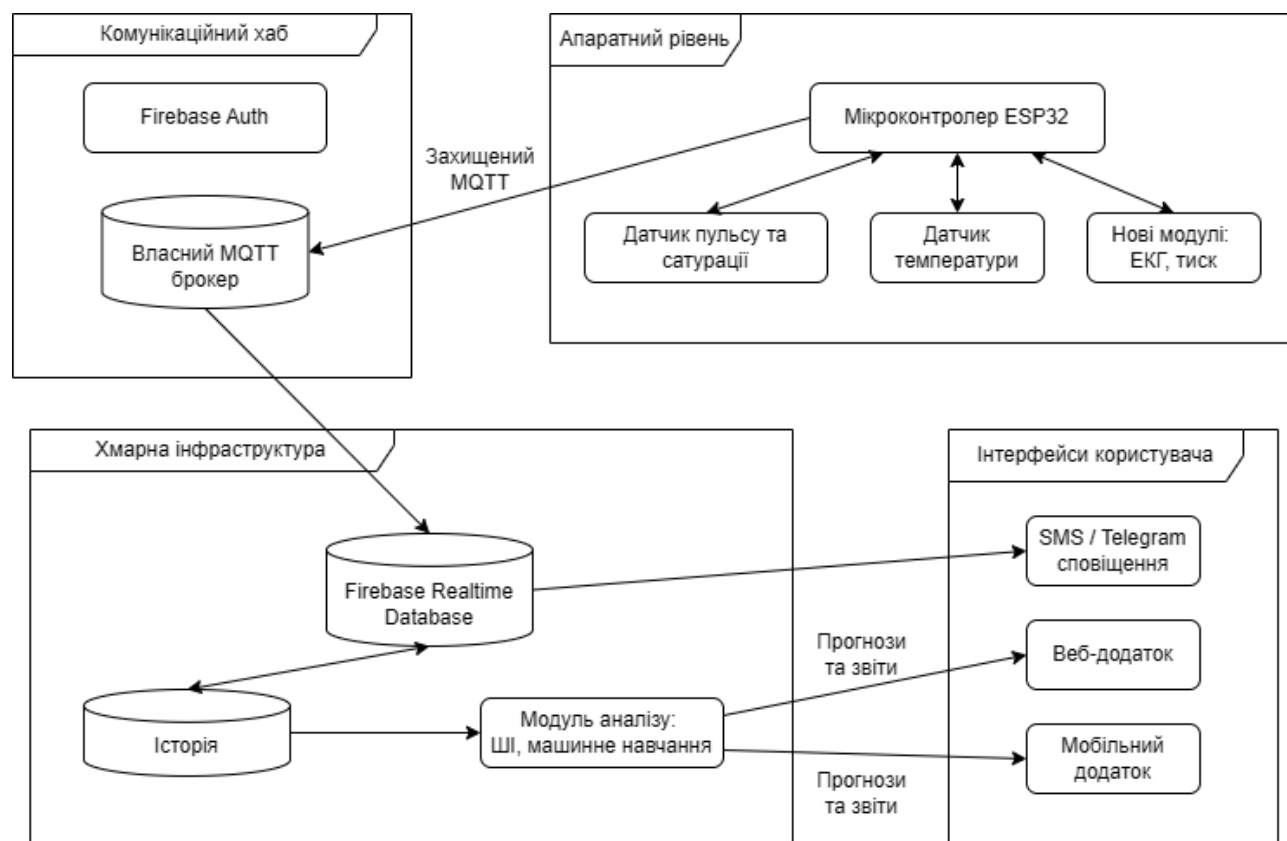


Рисунок 3.6 – Концептуальна схема майбутнього розширення та масштабування інфраструктури системи

Окремої уваги заслуговує вдосконалення процедур автокалібрування сенсорів, які дозволили б системі самостійно компенсувати дрейф показників,

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

що виникає внаслідок зміни температури або тривалого використання без ручного перекалібрування. Подальші заходи з модернізації будуть зосереджені на підвищенні метрологічної точності вимірювань та суттєвому розширенні функціональних можливостей шляхом інтеграції додаткових біометричних сенсорів — зокрема датчиків температури тіла, рівня кисню у крові та електрошкірного опору, що дозволить перетворити систему на більш комплексний інструмент оцінки фізіологічного стану користувача. Інтеграція нових сенсорних модулів потребуватиме відповідного розширення як апаратної платформи, так і програмних алгоритмів обробки та інтерпретації багатовимірних фізіологічних даних, включаючи розробку механізмів їх кореляційного аналізу для отримання більш інформативних діагностичних показників.

Паралельно з удосконаленням вимірювальної частини перспективним напрямом розвитку залишається поліпшення користувацьких інтерфейсів веб-додатку задля забезпечення максимальної зручності та інтуїтивності взаємодії. Це передбачає не лише косметичні зміни у візуальному оформленні, а й глибоке переосмислення логіки навігації, структури представлення даних та механізмів персоналізації, що дозволить адаптувати інтерфейс до різних профілів користувачів – від медичних фахівців до звичайних споживачів. Реалізація окреслених напрямів розвитку в сукупності дозволить суттєво підвищити конкурентоспроможність системи, розширити коло її потенційних застосувань та наблизити її до рівня повноцінного медично-орієнтованого рішення, придатного для використання не лише в дослідницькому, а й у клінічному або реабілітаційному контексті.

### 3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було здійснено практичну реалізацію системи моніторингу стану здоров'я, що передбачало повну інтеграцію апаратних

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компонентів та програмних модулів у єдиний функціональний комплекс. Цей етап охопив усі стадії – від фізичного монтажу та налагодження апаратної частини до розгортання серверної інфраструктури і клієнтського інтерфейсу. Він став важливою перевіркою коректності прийнятих раніше технічних рішень, підтвердивши стабільність роботи системи у режимі реального часу та її здатність до безперервного функціонування. Особлива увага під час реалізації приділялася узгодженню взаємодії між різнорідними компонентами, що дозволило забезпечити цілісність даних та усунути розбіжності між хаотичними фізичними сигналами сенсорів і структурованими вимогами програмної частини. Вирішення задачі сумісності зажадало розробки низки проміжних програмних рівнів та процедур нормалізації вхідних даних, які разом забезпечили коректну та передбачувану поведінку системи в умовах реальної експлуатації.

Програмна складова системи була успішно впроваджена як координуючий механізм, що керує процесами збору, цифрової фільтрації та передачі інформації через мережеві протоколи. Реалізована архітектура передбачає чіткий розподіл відповідальності між окремими модулями: збору даних, фільтрації сигналів та мережевої комунікації. Основна логіка роботи мікроконтролера була організована у безперервному циклі з мінімальними затримками, що є необхідною умовою для підтримки високої оперативності моніторингу. Паралельно з цим було реалізовано клієнтський веб-додаток, який завдяки використанню технологій асинхронного обміну даними забезпечує користувачеві зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для візуалізації отриманих результатів без необхідності ручного оновлення сторінок. Веб-інтерфейс реалізує динамічне відображення часових рядів фізіологічних показників у вигляді інтерактивних графіків, що дозволяє аналізувати як поточний стан, так і тенденції змін параметрів у ретроспективі.

Для всебічної оцінки працездатності розробки було впроваджено комплексну методику тестування, орієнтовану на перевірку основних функцій у максимально наближених до реальності умовах експлуатації.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведений порівняльний аналіз із наявними рішеннями виявив ряд суттєвих переваг створеного комплексу, зокрема його високу гнучкість, відносну простоту реалізації та повну відкритість для подальшої модифікації як на рівні апаратної конфігурації, так і програмних алгоритмів. На відміну від більшості комерційних аналогів, що функціонують у межах закритих екосистем, розроблена система надає дослідникам повний контроль над усіма аспектами її роботи, що є принциповою перевагою для науково-дослідних та освітніх застосувань. Встановлено, що система повністю відповідає встановленим технічним і функціональним вимогам, продемонструвавши високу надійність без фіксації помилок протягом усього періоду випробувань. Це дає підстави стверджувати про ефективність розробленого рішення та його готовність до практичного впровадження у сфері персонального моніторингу фізіологічних показників.

За результатами виконаних робіт можна констатувати, що система не лише успішно виконує початкові завдання, а й має значний потенціал для подальшого масштабування та вдосконалення. Архітектурна гнучкість рішення забезпечує можливість нарощування функціональності без кардинальної переробки існуючої кодової бази чи апаратної платформи. Виявлені під час тестів незначні відхилення показників окреслили перспективні напрями модернізації, насамперед у частині підвищення метрологічної точності та розширення аналітичних можливостей веб-інтерфейсу. Таким чином, успішна реалізація та апробація системи створили надійну основу для її подальшого розвитку та інтеграції нових діагностичних інструментів у майбутніх версіях проєкту. У перспективі система може бути доповнена модулями автоматичного аналізу даних із використанням алгоритмів машинного навчання для прогнозування потенційних ризиків для здоров'я користувача. Крім того, подальший розвиток проєкту передбачає інтеграцію з хмарними медичними платформами та мобільними застосунками для забезпечення повноцінного дистанційного моніторингу в режимі реального часу

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання даної роботи було розроблено та досліджено систему моніторингу стану здоров'я, яка поєднує сучасні апаратні та програмні рішення. Проведений аналіз предметної області дозволив визначити основні вимоги до системи та обґрунтувати вибір технологій, що забезпечують її ефективне функціонування.

У ході роботи було розроблено архітектуру системи, яка забезпечує взаємодію між апаратною та програмною частинами. Особливу увагу приділено організації збору та обробки даних, що дозволило досягти достатнього рівня точності та стабільності результатів. Використання мікроконтролера ESP32 забезпечило можливість реалізації системи з урахуванням вимог до продуктивності та енергоефективності.

Було реалізовано програмне забезпечення, яке забезпечує зчитування даних із сенсорів, їх обробку та передачу за допомогою мережевих протоколів. Отримані дані передаються до веб-додатку, який забезпечує їх відображення у зручному для користувача вигляді. Це дозволяє здійснювати моніторинг параметрів у режимі реального часу.

Проведене тестування підтвердило працездатність системи та її відповідність поставленим вимогам. Було встановлено, що система здатна стабільно функціонувати в різних умовах і забезпечувати своєчасну передачу даних. Разом із тим виявлено певні обмеження, пов'язані з впливом зовнішніх факторів і точністю вимірювань, що є характерним для систем даного типу.

Таким чином, у роботі досягнуто поставленої мети та вирішено всі основні задачі. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших досліджень і практичних розробок у сфері моніторингу стану здоров'я та Інтернету речей.

					КвРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. AlHousrya O., Bennagi A., Cotfas P. A., Cotfas D. T. IoT-Enabled Driver Health Monitoring System Using Multi-Modal Sensors and Cloud Integration. 2025 *IEEE 31st International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME): proc. of the conf. (2025, October)*. IEEE, 2025. P. 107-114.
2. Alserhani F. Intrusion detection and real-time adaptive security in medical IoT using a cyber-physical system design. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 15. Art. 4720.
3. Ejinaka O. R., Obeta U. M. Harnessing Intelligent Cyber-Physical Systems for Advanced Healthcare Delivery: A Scoping Review and Future Directions. *Intelligent Cyber-Physical Systems for Healthcare Solutions: From Theory to Practice*. Singapore: Springer, 2024. P. 419-438.
4. Embarak O. et al. AquaRescue: An IoT-Enabled Smart Safety Belt for Aquatic and Aviation Emergencies. 2025 *10th International Conference on Information Technology Trends (ITT): proc. of the conf. (2025, November)*. IEEE, 2025. P. 77-82.
5. Gawali P. P., Mahalle P. N., Sule B. Integration of Cyber-Physical Systems in Medicine: A Comprehensive Study. *Recent Trends in Artificial Intelligence & It's Applications*. 2024. Vol. 3, no. 1. P. 29-36.
6. Gharat P., Gopwad A. D. Smart cyber-physical systems. *Smart Cyber-Physical Systems: Innovations and Real-World Implications*. 2025. P. 153.
7. Alshehri H. Developing Multi-Factor Authentication and Biometric Verification Protocols for Enhancing Data Security in IoT Healthcare Devices. 2025 *17th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE): proc. of the conf. (Perth, Australia, 2025)*. IEEE, 2025. P. 367-373. doi: 10.1109/ICCAE64891.2025.10980555.
8. Hossain M. M., Kashem M. A., Nayan N. M., Chowdhury M. A. A Medical Cyber-physical system for predicting maternal health in developing countries using machine learning. *Healthcare Analytics*. 2024. Vol. 5. Art. 100285.

					КВРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Huanca F., Torres M., Rodriguez-Fernandez M., Núñez F. A cyber–physical system for real-time physiological data monitoring and analysis. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. Vol. 11, no. 17. P. 28918-28930.

10. Jeevetha V. S., Jayanthi B. Cyber-Physical System based Next-Generation Framework for AI-Driven Disease Diagnosis in IoT-Enabled Smart Healthcare Systems. *Cuestiones de Fisioterapia*. 2025. Vol. 54, no. 3. P. 1471-1497.

11. Kamatchi T. P., Priya D. Cyber Physical Systems in Clinical Setting. *Cyber Physical Systems-Advances and Applications*. *Bentham Science Publishers*, 2024. P. 45-81.

12. Khater H. M. et al. Empowering healthcare with cyber-physical system—a systematic literature review. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 83952-83993.

13. Kulkarni R. V., Shilimkar A., Bhegade S., Dadmal J. Real-time health monitoring system by integrating augmented reality and internet of things. *International Conference on Intelligent Communication, Control and Devices: proc. of the conf. (2024, May)*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 409-423.

14. Kumar B., Al Baloshi R., Sandeep J., Alwahaibi T. Design of heart rate monitoring system using visual simulation tool. *International Conference on Smart Cyber Physical Systems: proc. of the conf. (2024, September)*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 69-79.

15. Kumar N. S., Nithin P., Simon M., Nagaraju G., Swapna M. Intelligent safety wristband designed for women’s protection. [S. l.], 2024.

16. Kumar P. et al. Integration of cyber-physical systems with wearable devices: A new paradigm for patient monitoring. *Cognitive Cloud Computing*. CRC Press, 2026. P. 137-154.

17. Li Y. Cyber-Physical System in Healthcare. *Real-Time Cardiovascular Disease Detection Through Low-Power Embedded Devices*. North Carolina State University, 2025.

18. Intelligent Cyber-Physical Systems for Healthcare Solutions: From Theory to Practice / ed. by M. Mittal, J. Narayan. *Springer Nature*, 2024.

					КВРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Mudholkar P., Mudholkar M., Bhalodia C., Tank P. Addressing healthcare challenges with iomt in intelligent cyber-physical systems. *Intelligent Cyber-Physical Systems for Healthcare Solutions: From Theory to Practice*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 159-180.

20. Natrayan L. Integrating Cyber Physical Systems With Embedded Technology for Advanced Cardiac Care. *AI Approaches to Smart and Sustainable Power Systems*. IGI Global Scientific Publishing, 2024. P. 288-298.

21. Osman S., Supriyanto E. Application of Cyber-Physical System in the Emergency Department for Triage Processing Management. [S. l.], 2024.

22. Owolabi B. O. Cyber-physical security in smart healthcare: protecting IoT-enabled medical devices from spyware, ransomware, and network-based exploits. *Int J Res Publ Rev*. 2025. Vol. 6, no. 3. P. 1812-1826.

23. Pandey B., Tomar R., Upreti K., Kumari P., Upreti S. Smart cyber-physical systems in healthcare. *Smart Cyber-Physical Systems: Innovations and Real-World Implications*. 2025. P. 107.

24. Pandey B. et al. Smart cyber-physical systems in healthcare: Revolutionizing modern medicine in RPM and health security. *Smart Cyber-Physical Systems*. CRC Press, 2024. P. 107-123.

25. Parihar A. et al. Role of IOT in healthcare: Applications, security & privacy concerns. *Intelligent Pharmacy*. 2024. Vol. 2, no. 5. P. 707-714.

26. Parkavi A., Kumar V., Javeed S. M., Krishna Y., Chethan G. A. Smart Safety Solution: Wearable Health Tracker with Cloud Based Alerts and Fall Detection. *2025 International Conference on Vehicular Technology and Transportation Systems (ICVTTS): proc. of the conf. (2025, September)*. IEEE, 2025. P. 1-6.

27. Qureshi A. H., Manzoor B., Ibrahim A. Blockchain and cyber-physical systems in the smart healthcare. *Blockchain and Digital Twin for Smart Healthcare*. Elsevier, 2025. P. 69-81.

					КВРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. Rahim M., Lalouani W., Toubal E., Emokpae L. A digital twin-based platform for medical cyber-physical systems. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 174591-174607.

29. Ramudu K. et al. 6G cyber physical system based smart healthcare modelling by mobile edge network and artificial intelligence. *Wireless Personal Communications*. 2024. P. 1-16.

30. Revathy M. Cyber-Physical Systems in HealthCare. *Cyber Physical Systems-Advances and Applications*. Bentham Science Publishers, 2024. P. 134-153.

31. Saraf K. R., Malathi P. Cyber-Physical System-Based Secure Online Medication System. *Handbook of Research on Artificial Intelligence and Soft Computing Techniques in Personalized Healthcare Services*. Apple Academic Press, 2024. P. 325-348.

32. Sarkar A., Jhamb M. Secure and portable health monitoring system for Cyber Physical Systems in Internet of Things. *Engineering Research Express*. 2024. Vol. 6, no. 2. Art. 025357.

33. Siddiqui S., Khan A. A., Khattak M. A. K. Reviewing the Evolution of Intelligent Cyber-Physical Systems in the Internet of Medical Things. *Intelligent Cyber-Physical Systems for Healthcare Solutions: From Theory to Practice*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 135-157.

34. Srinidhi M. R. et al. DriveCare: Health Monitoring and Safety for Drivers. *2025 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT): proc. of the conf. (2025, September)*. IEEE, 2025. P. 1-5.

35. Srivastava J., Routray S. Cyber-physical system in AI-enabled smart healthcare system. *Secure and Smart Cyber-Physical Systems*. CRC Press, 2024. P. 118-134.

36. Taherdoost H. Wearable healthcare and continuous vital sign monitoring with IoT integration. *Computers, Materials, & Continua*. 2024. Vol. 81, no. 1. P. 79.

37. Tamilselvi M. A Novel Privacy enabled Human Health and Safety Monitoring System using IoT with Smart Wearable Device. *2024 2nd International*

					КВРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

*Conference on Self Sustainable Artificial Intelligence Systems (ICSSAS): proc. of the conf. (2024, October). IEEE, 2024. P. 1021-1027.*

38. Tanchak K., Singhal S., Mishra A., Suthar O. P. Role of Intelligent Techniques for Cyber-Physical Systems in Healthcare. *Intelligent Cyber-Physical Systems for Healthcare Solutions: From Theory to Practice*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 55-93.

39. Țiplea F. L. Security and privacy requirements for RFID schemes in healthcare: Case studies, solutions, and challenges. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 246. P. 752-761.

40. Wu Y., Zhai Y., Zhou H. The design of a university student physical measurement system based on ESP32. *Proceedings of the 2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Education*. 2024, November. P. 80-86.

41. iF Design: офіційний сайт. URL: <https://ifdesign.com/en/> (дата звернення: 01.05.2026).

42. Мережа магазинів техніки та електроніки МТА: офіційний сайт. URL: <https://mta.ua/> (дата звернення: 01.05.2026).

43. Інтернет-магазин ROZETKA: офіційний сайт. URL: <https://rozetka.com.ua/> (дата звернення: 01.05.2026).

44. Ali A., Hossain M. IoT-based smart healthcare monitoring system: A comprehensive review. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 2. Art. 450.

45. Chen Y., Wang H. Edge computing enabled medical cyber-physical systems for real-time patient monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. Vol. 11, no. 5. P. 8230-8241.

46. Gupta R., Srivastava A. Security and privacy in healthcare cyber-physical systems: Challenges and solutions. *Computers in Biology and Medicine*. 2024. Vol. 169. Art. 107905.

47. Sharma P., Kumar M. AI-driven predictive analytics for wearable IoT devices in personalized medicine. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024. Vol. 20, no. 3. P. 4110-4120.

					КВРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

48. Zhang L., Liu X., Patel S. Deep learning for anomaly detection in continuous vital signs monitoring via medical IoT. *Future Generation Computer Systems*. 2024. Vol. 152. P. 145-156.

49. Singh A., Chatterjee K. Securing internet of medical things (IoMT) using blockchain and smart contracts. *Journal of Network and Computer Applications*. 2024. Vol. 224. Art. 103841.

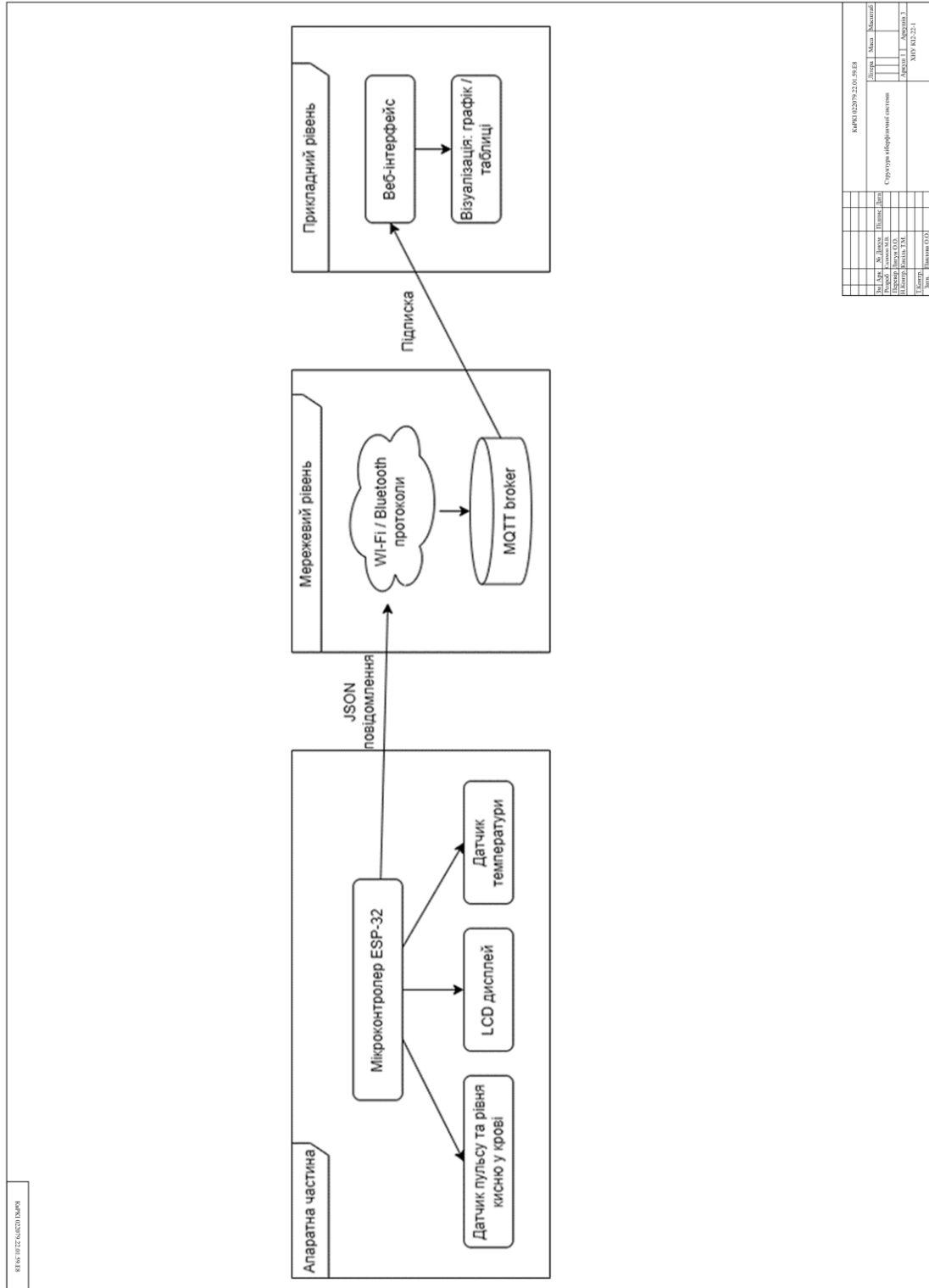
50. Johnson D., Lee K. Wearable cyber-physical systems for remote elderly care: Architecture and performance evaluation. *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24, no. 8. P. 12055-12065.

					КВРКІ.022079.22.01.59 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

# ДОДАТОК А

(обов'язковий)

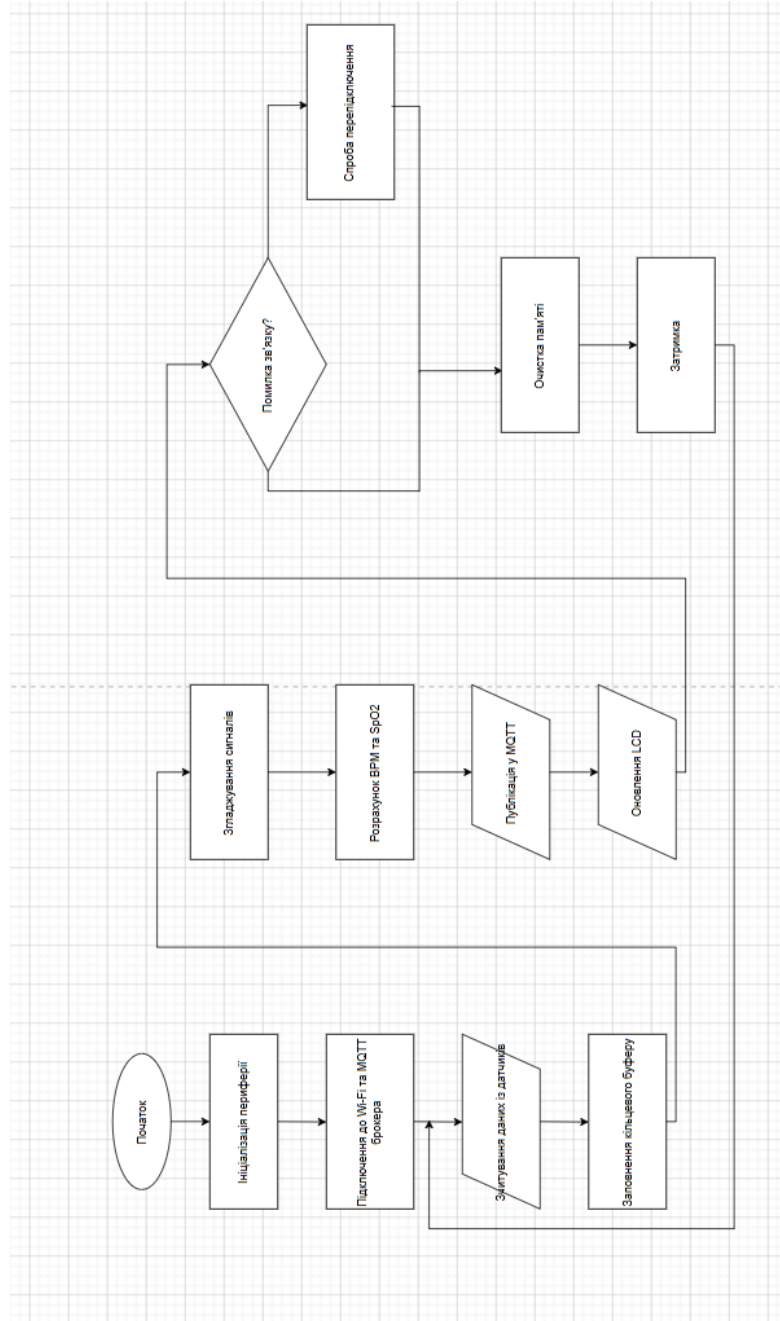
Копія креслення «Структура кіберфізичної системи»



# ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

Копія креслення «Схема електрична принципова»





## ДОДАТОК Г

(обов'язковий)

Лістинг програмного забезпечення прошивки мікроконтролера

```
import machine
import dht
import time
import network
from machine import Pin, SoftI2C, UART
from umqtt.simple import MQTTClient

WIFI_SSID = "Wokwi-GUEST"
WIFI_PASSWORD = ""
MQTT_BROKER = "broker.mqttdashboard.com"
MQTT_CLIENT_ID = "esp32-air-quality-tkachuk"
TOPIC_PUB = "cps/room/air_quality"

i2c = SoftI2C(scl=Pin(22), sda=Pin(21), freq=400000)
try:
    from i2c_lcd import I2cLcd
    lcd = I2cLcd(i2c, 0x27, 4, 20)
except:
    lcd = None

dht_sensor = dht.DHT22(Pin(19))
uart = UART(2, baudrate=9600, tx=17, rx=16)

red = Pin(27, Pin.OUT)
green = Pin(14, Pin.OUT)
blue = Pin(12, Pin.OUT)

def set_rgb(r, g, b):
    red.value(r)
    green.value(g)
    blue.value(b)

def connect_wifi():
    wlan = network.WLAN(network.STA_IF)
    wlan.active(True)
    if not wlan.isconnected():
        print('Connecting to WiFi...')
        wlan.connect(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD)
        while not wlan.isconnected():
            set_rgb(0, 0, 1)
            time.sleep(0.5)
            set_rgb(0, 0, 0)
            time.sleep(0.5)
    print('WiFi connected:', wlan.ifconfig())
```

```

def get_co2():
    command = b'\xff\x01\x86\x00\x00\x00\x00\x00\x79'
    uart.write(command)
    time.sleep(0.1)
    if uart.any() >= 9:
        res = uart.read(9)
        if res[0] == 0xff and res[1] == 0x86:
            return res[2] * 256 + res[3]
    return None

connect_wifi()

print("Connecting to MQTT...")
client = MQTTClient(MQTT_CLIENT_ID, MQTT_BROKER)
try:
    client.connect()
    print("MQTT Connected!")
except:
    print("MQTT Connection failed")

while True:
    try:
        dht_sensor.measure()
        t = dht_sensor.temperature()
        h = dht_sensor.humidity()
        co2_val = get_co2()

        if co2_val is not None:
            if lcd:
                lcd.move_to(0,0)
                lcd.putstr("Air Monitor (Online)")
                lcd.move_to(0,1)
                lcd.putstr(f"Temp: {t}C Hum: {h}%")
                lcd.move_to(0,2)
                lcd.putstr(f"CO2: {co2_val} ppm")

                if co2_val < 800: set_rgb(0, 1, 0)
                elif co2_val < 1200: set_rgb(1, 1, 0)
                else: set_rgb(1, 0, 0)

                payload = '{{"temp": {}, "hum": {}, "co2": {}}}'.format(t,
h, co2_val)
                client.publish(TOPIC_PUB, payload)
                print("Published:", payload)

                if lcd:
                    lcd.move_to(0,3)
                    lcd.putstr("Data sent to Broker")

    except Exception as e:
        print("Loop error:", e)
        try:

```

```
        client.connect()
    except:
        pass

time.sleep(5):
```