

Міністерство освіти і науки України
Державний заклад
«Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»

Навчально-науковий інститут математики та інформаційних технологій

Кафедра інформаційних технологій та систем

Монахова Євгенія Михайлівна

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ
МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЛЮДИНИ НА ОСНОВІ ІОТ З
ВИКОРИСТАННЯМ ESP32**

кваліфікаційна робота

здобувача вищої освіти другого (магістерського) рівня

освітньої програми «Комп'ютерні мережі»

за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

Особистий підпис _____ Євгенія Монахова

Науковий керівник _____ Володимир ДОНЧЕНКО,
старший викладач кафедри
інформаційних технологій та систем

Завідувач кафедри _____ Микола СЕМЕНОВ,
кандидат педагогічних наук, доцент
кафедри інформаційних технологій
та систем

АНОТАЦІЯ

Монахова Є. М.

Тема: Розробка та дослідження автоматизованої системи моніторингу стану людини на основі IoT з використанням ESP32.

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія».

Установа: ЛНУ імені Тараса Шевченка, 2026 р.

Магістерська робота містить: 92 с., 80 рис., 4 табл., 1 додат., 35 джерел.

Об'єкт дослідження є процес дистанційного моніторингу фізіологічного стану людини.

Предметом дослідження є методи, апаратні та програмні засоби побудови автоматизованих систем моніторингу здоров'я людини на базі технологій Інтернету речей та мікроконтролера ESP32.

Метою роботи є розробка та дослідження автоматизованої системи моніторингу стану людини на основі технології IoT з використанням платформи ESP32 для забезпечення оперативного дистанційного контролю життєво важливих показників.

Результати роботи. У ході виконання роботи проаналізовано сучасні технології Інтернету медичних речей (IoMT) та обґрунтовано вибір апаратної платформи ESP32. Розроблено структурну та електричну принципову схеми портативного пристрою для вимірювання частоти серцевих скорочень, сатурації (SpO₂), температури тіла та зняття ЕКГ із використанням сенсорів MAX30102, AD8232 та MAX30205. Створено програмне забезпечення, яке реалізує алгоритми первинної обробки біосигналів, їх візуалізацію на локальному OLED-дисплеї та передачу бездротовими каналами зв'язку. Налагоджено дистанційний моніторинг через хмарну платформу ThingSpeak (Wi-Fi) та мобільний додаток (Bluetooth). Виготовлено дослідний зразок системи та проведено його тестування, яке підтвердило працездатність пристрою та достатню точність вимірювань для побутового використання.

Практичне значення. Розроблений апаратно-програмний комплекс є функціонально завершеним прототипом, придатним для персонального моніторингу здоров'я в домашніх умовах, дистанційного нагляду за пацієнтами з хронічними захворюваннями та використання в навчальному процесі.

Ключові слова. ВІДДАЛЕНИЙ МОНІТОРИНГ, СЕНСОРИ, ЗБІР ДАНИХ, ФІЗІОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ОРГАНІЗМУ, БЕЗДРОТОВА МЕРЕЖА, ДАТЧИКИ, ESP32, ХМАРНІ СЕРВІСИ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ IOT, THINGSPEAK.

ABSTRACT

Monakhova Yevheniia

Theme: Development and research of an automated human condition monitoring system based on IoT using ESP32.

Speciality: 123 "Computer Engineering"

Institution: Luhansk Taras Shevchenko National University (LTSNU), 2026.

Master's work of: 92 pages, 80 Fig., 4 Table, 1 adj., 35 source.

A research object is the process of remote monitoring of a person's physiological state.

The article of research is methods, hardware and software tools for building automated human health monitoring systems based on Internet of Things technologies and the ESP32 microcontroller.

An aim of work is development and research of an automated human condition monitoring system based on IoT technology using the ESP32 platform to ensure operational remote monitoring of vital signs.

Job performances. In the course of the work, modern Internet of Medical Things (IoMT) technologies were analyzed and the choice of the ESP32 hardware platform was justified. A structural and electrical schematic diagram of a portable device for measuring heart rate, saturation (SpO₂), body temperature, and ECG recording using MAX30102, AD8232, and MAX30205 sensors was developed. Software was created that implements algorithms for primary processing of biosignals, their visualization on a local OLED display, and transmission via wireless communication channels. Remote monitoring was established via the ThingSpeak cloud platform (Wi-Fi) and a mobile application (Bluetooth). A prototype of the system was manufactured and tested, which confirmed the device's operability and sufficient measurement accuracy for domestic use.

Practical significance. The developed hardware and software complex is a functionally complete prototype suitable for personal health monitoring at home, remote supervision of patients with chronic diseases, and use in the educational process.

Keywords. REMOTE MONITORING, SENSORS, DATA COLLECTION, PHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF THE ORGANISM, WIRELESS NETWORK, SENSORS, ESP32, CLOUD SERVICES, INTERNET OF THINGS IoT, THINGSPEAK.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ	10
1.1. Характеристика об'єкта дослідження	10
1.2. Предметна область дистанційного моніторингу стану здоров'я	13
1.3. Інтернет медичних речей (IoMT) у віддаленому моніторингу	16
1.4. Огляд та аналіз існуючих систем і технологій дистанційного моніторингу	18
Висновки до розділу	30
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ.....	32
2.1. Методи віддаленого моніторингу функціонального стану організму людини	32
2.2. Методи та апаратні засоби вимірювання фізіологічних параметрів стану здоров'я людини.....	36
2.2.1. Опис платформи ESP32 WROOM	36
2.2.2. Опис давача пульсу та сатурації MAX30102	43
2.2.3. Опис модуля AD8232 для зняття електрокардіограми (ЕКГ)	47
2.2.4. Опис давача для вимірювання температури тіла MAX30205	51
2.2.5. Опис контролера заряду акумулятора TP4056	53
2.2.6. Опис OLED-дисплея	55
2.3. Опис схеми електричної принципової портативного пристрою для автоматизованої системи моніторингу стану людини на базі ESP32.....	58
2.4. Висновки до розділу	60
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЛЮДИНИ НА БАЗІ ESP32	61
3.1. Розробка алгоритму роботи програми системи моніторингу стану людини	61

3.2. Вибір засобів реалізації та середовища розробки програмного забезпечення	63
3.2.1. Налаштування середовища розробки для модуля ESP32	65
3.2.2. Встановлення зовнішніх бібліотек.....	66
3.3. Розробка програмного забезпечення для проєктованої системи	67
3.3.1. Програмна реалізація опитування датчика серцевого ритму.....	67
3.3.2. Програмна реалізація опитування датчика температури тіла	68
3.3.3. Програмна реалізація відображення результатів моніторингу на OLED дисплеї.....	69
3.3.4. Програмна реалізація опитування модуля ЕКГ AD8232	72
3.4. Реалізація віддаленого моніторингу показників здоров'я з використанням IoT-платформи.....	75
3.4.1. Обґрунтування вибору IoT-платформи	75
3.4.2. Створення та налаштування каналу в ThingSpeak	76
3.4.3. Програмна реалізація передачі даних в ThingSpeak	77
3.4.4. Відображення результатів моніторингу в ThingSpeak.....	78
3.5. Налаштування мобільного додатку Bluetooth Graphics	79
3.6. Тестування системи моніторингу показників серцевої діяльності людини	81
Висновки до розділу	84
ВИСНОВКИ	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	89
ДОДАТОК.....	93

ВСТУП

Сучасний етап розвитку інформаційних та телекомунікаційних технологій характеризується активним упровадженням автоматизованих систем у сферу охорони здоров'я. Глобальні тенденції, такі як старіння населення, зростання кількості серцево-судинних захворювань та хронічних патологій, а також необхідність профілактичного контролю фізіологічного стану людини, зумовлюють підвищений попит на засоби дистанційного моніторингу. Особливої значущості набувають портативні та енергоефективні пристрої, здатні забезпечувати безперервний збір, обробку та передавання біомедичних даних у режимі реального часу.

Одним із найбільш перспективних напрямів вирішення цих завдань є використання концепції Інтернету медичних речей (Internet of Medical Things, IoMT). Ця технологія об'єднує сенсорні пристрої, бездротові канали зв'язку та хмарні платформи в єдину екосистему, що дозволяє реалізувати віддалений лікарський контроль, зменшити навантаження на медичний персонал та підвищити оперативність прийняття клінічних рішень у критичних ситуаціях.

Незважаючи на наявність на ринку значної кількості комерційних рішень, актуальним залишається завдання створення доступної комплексної системи з відкритою архітектурою. Більшість існуючих аналогів є пропрієтарними, мають високу вартість або обмежені можливості інтеграції з користувацькими IoT-платформами. Це зумовлює необхідність розробки власних апаратно-програмних комплексів, які поєднували б портативність, багатофункціональність та можливість гнучкого налаштування під потреби пацієнта.

Як апаратну основу для такої системи доцільно використовувати сучасні мікроконтролери, зокрема ESP32. Ця платформа вирізняється оптимальним співвідношенням обчислювальної потужності та енергоспоживання, а також наявністю вбудованих модулів бездротового зв'язку (Wi-Fi та Bluetooth). У поєднанні з високоточними біомедичними сенсорами (такими як MAX30102 для пульсоксиметрії, AD8232 для ЕКГ та MAX30205 для термометрії) це дозволяє

створити недорогий, але ефективний пристрій для комплексного моніторингу життєво важливих показників.

З огляду на викладене, тема магістерської роботи, присвячена розробці та дослідженню автоматизованої системи моніторингу стану людини на базі ESP32 з інтеграцією у хмарні сервіси (зокрема ThingSpeak), є важливою науково-прикладною задачею, вирішення якої сприятиме подальшому розвитку телемедицинських технологій та підвищенню якості медичного обслуговування.

Об'єкт дослідження є процес дистанційного моніторингу фізіологічного стану людини.

Предметом дослідження є методи, апаратні та програмні засоби побудови автоматизованих систем моніторингу здоров'я людини на базі технологій Інтернету речей та мікроконтролера ESP32.

Метою роботи є розробка та дослідження автоматизованої системи моніторингу стану людини на основі технології IoT з використанням платформи ESP32 для забезпечення оперативного дистанційного контролю життєво важливих показників.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести огляд та аналіз існуючих рішень, технологій та систем дистанційного моніторингу здоров'я в рамках концепції IoMT.
2. Обґрунтувати вибір апаратної платформи та сенсорів для вимірювання фізіологічних параметрів (пульс, сатурація, ЕКГ, температура).
3. Розробити структурну та електричну принципову схему портативного пристрою на базі контролера ESP32.
4. Спроекувати алгоритми роботи системи та реалізувати програмне забезпечення для зчитування, обробки та відображення даних на локальному OLED-дисплеї.
5. Реалізувати передачу даних на хмарну платформу ThingSpeak та налаштувати взаємодію з мобільним додатком через Bluetooth.

6. Провести тестування розробленої системи та проаналізувати отримані результати.

У роботі використано **методи дослідження**:

- *аналізу та синтезу* – при дослідженні існуючих аналогів та проектуванні структури системи;
- *схемотехнічного проектування* – при розробці апаратної частини пристрою;
- *алгоритмізації та програмування* – при розробці прошивки мікроконтролера та налаштуванні передачі даних;
- *експериментального дослідження* – при тестуванні працездатності системи та точності вимірювань сенсорів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у подальшому розвитку методів побудови біомедичних систем на базі IoT шляхом інтеграції різномірних сенсорів (оптичних, електричних та температурних) у єдиний портативний комплекс на базі ESP32 з використанням гібридної передачі даних (Wi-Fi/Cloud та Bluetooth), що забезпечує підвищену автономність та універсальність моніторингу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблений прототип пристрою дозволяє здійснювати комплексний моніторинг серцевої діяльності та температури тіла в домашніх умовах. Результати роботи можуть бути використані для створення персональних трекерів здоров'я, систем догляду за літніми людьми або як навчальний макет для вивчення основ біомедичної електроніки та IoT.

Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

У першому розділі проведено аналіз предметної області, розглянуто концепцію IoMT та існуючі аналоги систем моніторингу.

У другому розділі обґрунтовано вибір елементної бази (ESP32, MAX30102, AD8232, MAX30205) та розроблено апаратну частину системи.

У третьому розділі описано розробку програмного забезпечення, інтеграцію з платформою ThingSpeak та результати тестування готового пристрою.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

1.1. Характеристика об'єкта дослідження

Метаболічні процеси в організмі людини відбуваються безперервно протягом доби, при цьому окремі сигнали, що виникають у процесі життєдіяльності, можуть слугувати індикаторами фізіологічного стану та дозволяти оцінювати або прогнозувати стан здоров'я. Реєстрація й аналіз таких сигналів є важливим інструментом у медичній діагностиці, профілактиці захворювань і контролі функціонального стану людини [23, 24].

Людський організм генерує велику кількість фізіологічних сигналів, зокрема серцеві скорочення та дихальні рухи, які зберігаються навіть у стані спокою. На рисунку 1.1 представлено основні фізичні сигнали (електричні, артеріальний тиск, температура) та хімічні сигнали (слина, кров, слюзи, піт), що можуть бути отримані з тіла людини.

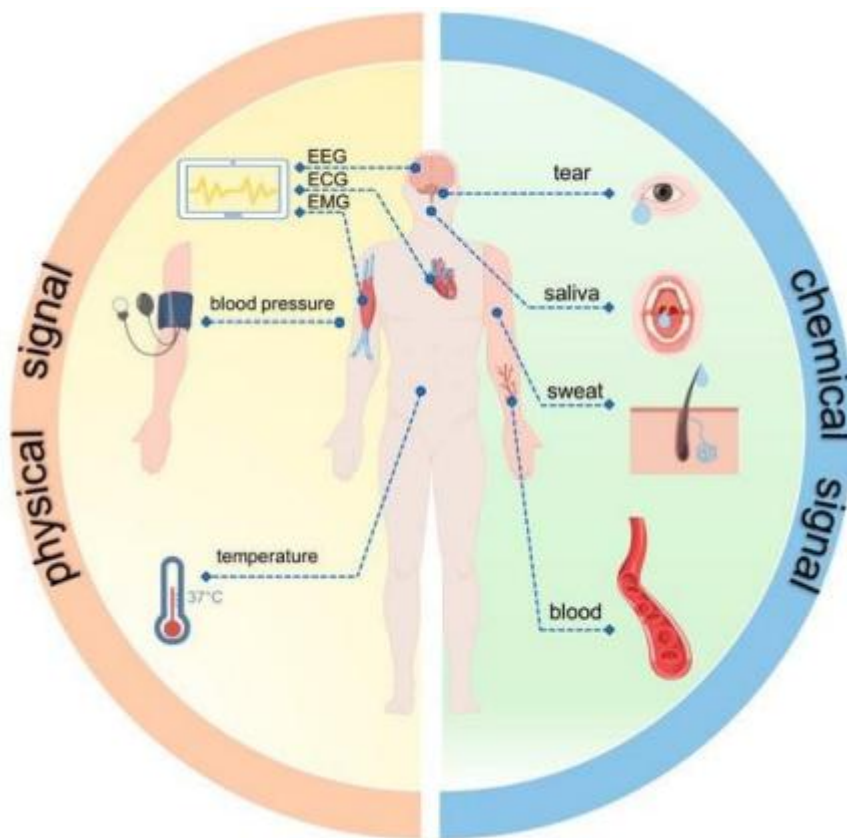


Рис. 1.1. Фізичні та хімічні сигнали, що можуть бути зібрані з людського тіла
[23]

Моніторинг зазначених сигналів має ключове значення для оцінювання стану здоров'я людини [25]. Для їх реєстрації застосовуються сенсори, які виконують роль «органів спостереження» та забезпечують зчитування параметрів, що характеризують фізіологічний стан організму. Оскільки сенсори можуть ґрунтуватися на різних фізичних і хімічних принципах, важливим є чітке розуміння класифікації сигналів людського тіла. За своєю природою такі сигнали поділяються на фізичні та хімічні.

Фізичні сигнали являють собою фізичні носії інформації, за допомогою яких відображаються певні стани, властивості та зміни в організмі людини. Тіло людини характеризується значною кількістю параметрів фізичних сигналів, що дозволяють оцінювати поточний фізіологічний стан і прогнозувати можливі ризики для здоров'я. До основних фізичних сигналів належать електричні фізіологічні сигнали, артеріальний тиск, температура тіла, параметри дихання та прискорення рухів.

Фізіологічні електричні сигнали — це регулярні електричні коливання, тісно пов'язані з функціонуванням організму як у стані активності, так і в умовах спокою. До цієї групи належать електроенцефалографічні (ЕЕГ), електрокардіографічні (ЕКГ) та електроміографічні (ЕМГ) сигнали, зокрема:

- ЕЕГ-сигнали відображають зміни електричної активності головного мозку;
- ЕКГ-сигнали характеризують процеси, що відбуваються під час кожного серцевого циклу, та є важливими для контролю функціонального стану серцево-судинної системи;
- ЕМГ-сигнали відображають електричну активність м'язів під час їх скорочення та широко застосовуються для аналізу рухової активності й оптимізації тренувального процесу.

Артеріальний тиск визначається як сила, з якою кров діє на одиницю площі стінок кровоносних судин під час її циркуляції в організмі. Для осіб із артеріальною гіпертензією безперервне відстеження показників артеріального тиску є особливо важливим. Використання портативних і носимих пристроїв дає

змогу здійснювати цілодобовий контроль цього параметра, що сприяє своєчасному виявленню відхилень та підвищує рівень безпеки й ефективності управління станом здоров'я користувача.

Температура тіла є одним із ключових показників фізіологічного стану людини. У нормі її значення коливається в межах 36–37 °C незалежно від впливу зовнішніх факторів. Підтримання сталої температури є необхідною умовою для нормального перебігу обмінних процесів і життєдіяльності організму. Хоча людина може суб'єктивно відчувати холод або тепло, внутрішня температура зазвичай залишається стабільною. У разі інфекційних захворювань вона підвищується внаслідок активації імунної відповіді, тоді як тривалий вплив низьких температур може призвести до зниження температури ядра тіла та розвитку гіпотермії.

Дихання являє собою процес обміну газами між організмом і навколишнім середовищем та може слугувати ефективним неінвазивним показником стану здоров'я. Частота й амплітуда дихальних рухів мають важливе діагностичне значення та широко використовуються для оцінювання функціонального стану організму. Носимі, зокрема наручні, сенсори здатні оперативно реєструвати ці параметри, забезпечуючи їх подальший аналіз і тривалий моніторинг. Закріплення датчиків на поверхні тіла дозволяє безперервно контролювати дихальну активність людини.

Датчики прискорення здебільшого застосовуються для реєстрації параметрів рухової активності, таких як швидкість переміщення, темп рухів і зміни положення тіла. Швидкість просторового переміщення визначається як швидкість зміщення, тоді як швидкість виконання окремих рухових дій характеризується швидкістю дії. Аналіз змін прискорення дає змогу оцінювати положення тіла, визначати активність користувача та своєчасно виявляти небезпечні ситуації, зокрема падіння, або надсилати тривожні сигнали після їх виникнення. Перспективні носимі пристрої передбачають інтеграцію декількох сенсорів, що дозволить одночасно відстежувати різні фізіологічні параметри та використовувати їх у комплексі для більш точної оцінки стану здоров'я.

Хімічні, або біохімічні, сигнали представлені молекулами, які забезпечують міжклітинну взаємодію в організмі. Людське тіло містить велику кількість таких сигналів, що можуть бути отримані з біологічних рідин, зокрема крові, слини, сліз, поту та сечі. За допомогою носимих сенсорів можливе визначення різноманітних біохімічних показників, серед яких рН, концентрація лактату, рівень глюкози, вміст електролітів, ступінь насичення киснем та інші параметри.

Слина, слюзи, піт і сеча мають перевагу з точки зору неінвазивного забору, що робить їх перспективними для безперервного моніторингу стану організму. Аналіз біохімічного складу цих рідин дозволяє оцінювати стан здоров'я людини, а в окремих випадках — використовувати їх як джерело енергії для живлення сенсорних пристроїв. Подальший розвиток сенсорних технологій орієнтований на неінвазивні методи збору даних, при цьому електрохімічні сенсори є особливо привабливими завдяки високій чутливості, можливості мініатюризації та відносно низькій вартості. Інтеграція кількох хімічних сенсорів у єдину систему створює умови для багатопараметричного неінвазивного контролю.

Біосенсори можуть класифікуватися за різними ознаками, зокрема за принципом дії, функціональним призначенням та сферою застосування. Залежно від методу вимірювання їх поділяють на сенсори, що здійснюють моніторинг фізичних сигналів, та сенсори, орієнтовані на реєстрацію хімічних сигналів. За характером взаємодії з організмом людини біосенсори поділяються на інвазивні (*in vivo*) та неінвазивні (*in vitro*), які також можуть розглядатися як імплантовані та носимі сенсорні системи відповідно [24].

1.2. Предметна область дистанційного моніторингу стану здоров'я

Сучасні підходи у сфері охорони здоров'я орієнтовані на впровадження систем безперервного віддаленого контролю фізіологічного стану пацієнтів із використанням натільних сенсорів. Такі сенсорні мережі дають змогу автоматизувати процес збору медичних даних, мінімізувати потребу в ручному вимірюванні показників і забезпечити своєчасне виявлення відхилень фізіологічних параметрів від нормативних значень. Дистанційний моніторинг

стану здоров'я (МСЗ) передбачає розміщення компактних датчиків безпосередньо на тілі людини, що забезпечує безперервне відстеження життєво важливих показників і зменшує ризик розвитку критичних станів.

Прикладом практичного застосування таких систем є автоматизовані інсулінові ін'єктори, які здійснюють контроль рівня глюкози в крові та дозоване введення інсуліну у разі перевищення допустимих значень. Не менш важливим напрямом медичної практики є постійний моніторинг артеріального тиску, який дозволяє підвищити якість профілактики та лікування серцево-судинних захворювань. Використання віддалених систем моніторингу сприяє зменшенню кількості відвідувань медичних закладів, що, своєю чергою, знижує фінансові витрати на медичне обслуговування [2].

Інтеграція технологій дистанційного моніторингу в медичну практику створює умови для тривалого перебування осіб похилого віку у звичному домашньому середовищі, без необхідності госпіталізації або розміщення в спеціалізованих установах. Такий підхід є економічно доцільною та ефективною альтернативою стаціонарному спостереженню за станом пацієнтів. Безперервний контроль фізіологічних показників сприяє ранньому виявленню неврологічних, серцево-судинних і захворювань дихальної системи, що істотно підвищує ефективність лікування. Застосування портативних медичних пристроїв у поєднанні з методами аналізу накопичених даних формує основу концепції «мобільного здоров'я» (mHealth) [3].

Поняття «моніторинг» у науковій літературі трактується багатогранно та охоплює низку підходів до його визначення. У загальному розумінні моніторинг являє собою систематичний процес дослідження об'єкта з метою отримання достовірної інформації для ефективного управління відповідними процесами. Таким чином, моніторинг включає функції контролю, діагностики та прогнозування, які є ключовими складовими систем керування. У контексті охорони здоров'я моніторинг розглядається як безперервне спостереження за станом пацієнта, його оцінювання та прогнозування можливих змін. Типову

структуру системи дистанційного моніторингу, оцінювання та прогнозування стану здоров'я пацієнтів наведено на рисунку 1.2 [4].



Рис. 1.2. Структурна схема системи дистанційного моніторингу, оцінювання та прогнозування стану здоров'я пацієнтів [4]

Процес моніторингу охоплює кілька взаємопов'язаних складових, а саме:

- інформаційну, що передбачає збирання, накопичення, систематизацію та поширення даних;
- проблемно-аналітичну, орієнтовану на завчасне виявлення процесів, закономірностей, потенційних загроз і проблемних ситуацій;
- управлінську, яка включає аналіз результативності прийнятих рішень та оцінювання їхніх наслідків [4].

Дослідження, що базуються на використанні моніторингу, є ефективним інструментом аналізу різних аспектів системи охорони здоров'я. Незважаючи на наявні організаційні та технічні труднощі, реалізація моніторингу в медичній сфері має здійснюватися з дотриманням низки базових принципів [5]:

- однорідність об'єктів спостереження;

- системність, що передбачає взаємозв'язок узагальнених і часткових показників;
- комплексність, яка забезпечує охоплення всіх ключових процесів;
- адаптивність, відповідно до якої набір показників повинен відповідати чинним вимогам і державним стандартам.

Таким чином, моніторинг у медичній галузі розглядається як безперервний або періодичний процес збирання, узагальнення та аналізу інформації про фізичний стан людини з подальшим використанням отриманих даних для діагностики, прогнозування та прийняття обґрунтованих управлінських рішень, спрямованих на збереження і покращення здоров'я.

1.3. Інтернет медичних речей (IoMT) у віддаленому моніторингу

Використання технологій Інтернету речей (Internet of Things, IoT) у сфері охорони здоров'я відіграє важливу роль як у профілактиці захворювань, так і в лікуванні хронічних патологій. Застосування концепції IoT у системах дистанційного моніторингу стану здоров'я дозволяє здійснювати віддалене вимірювання та передавання показників фізіологічного стану людини в режимі реального часу.

У медичній галузі технології Інтернету речей використовуються для контролю життєво важливих параметрів, запобігання виникненню критичних ситуацій і забезпечення оперативного реагування медичного персоналу. Водночас важливим напрямом є організація тривалого віддаленого спостереження за пацієнтами, яке не потребує негайного втручання у разі незначних відхилень показників від норми та дозволяє здійснювати контроль без обов'язкового відвідування лікувального закладу. Загалом впровадження IoT у медицині забезпечує підвищення мобільності, рівня безпеки, швидкості обробки даних і повноти медичної інформації [8].

Інтернет медичних речей (Internet of Medical Things, IoMT) являє собою сукупність медичних пристроїв і програмних засобів, інтегрованих з інформаційно-комунікаційними системами охорони здоров'я за допомогою комп'ютерних мереж. Медичні пристрої, оснащені бездротовими інтерфейсами,

зокрема Wi-Fi, забезпечують міжмашинну взаємодію, що є базовою основою функціонування IoMT. Компоненти IoMT зазвичай підключаються до хмарних сервісів для зберігання, оброблення та аналізу даних (рис. 1.3) [9].

Таким чином, Інтернет медичних речей є результатом адаптації технологій IoT до потреб сфери охорони здоров'я та орієнтований на накопичення й інтелектуальний аналіз даних з метою моніторингу й дослідження стану пацієнтів. Концепція IoMT передбачає інтеграцію медичних ресурсів і сервісів у єдину інформаційну систему медичного обслуговування. Практичне застосування пристроїв IoMT для дистанційного контролю стану здоров'я пацієнтів у домашніх умовах також відоме під назвою «телемедицина». Такий підхід зменшує потребу в частих візитах до медичних закладів у разі консультацій або змін у самопочутті. Сенсори, що вимірюють життєво важливі фізіологічні показники, під'єднуються до медичних пристроїв і функціонують як ключові елементи систем IoMT [10].

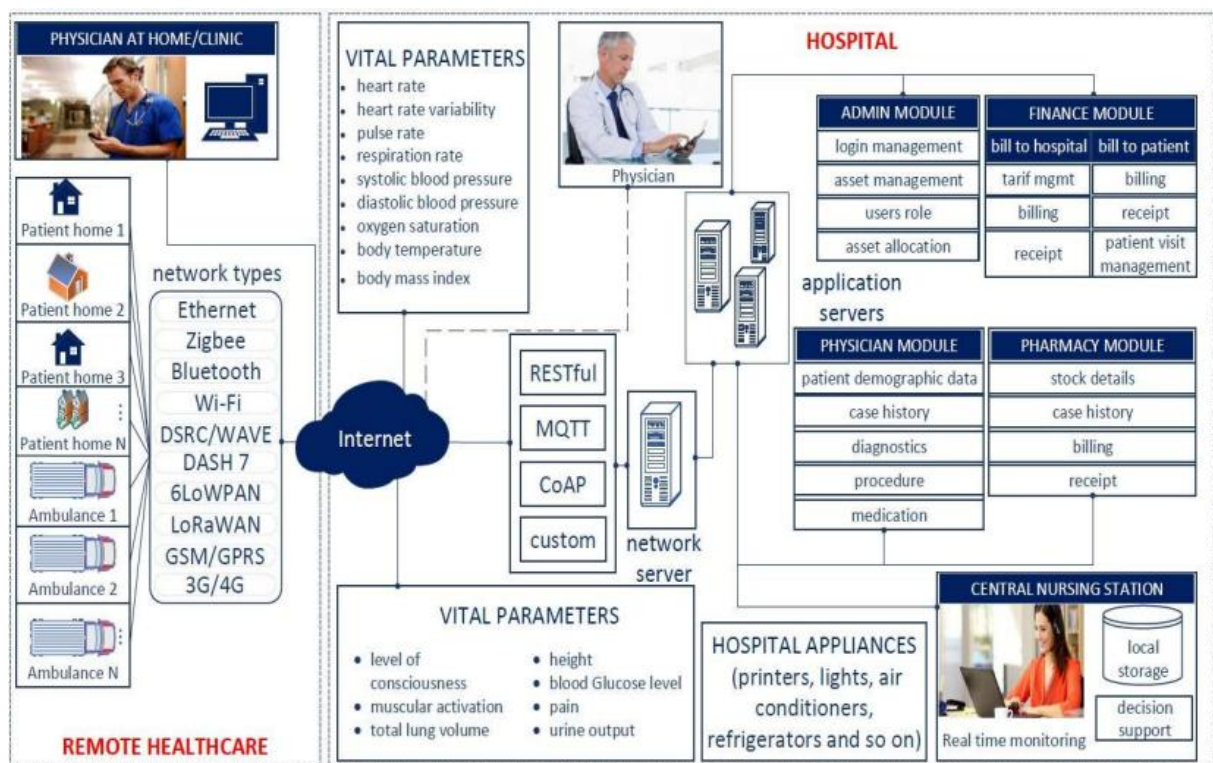


Рис. 1.3. Архітектурна модель інтернету медичних речей (IoMT) [10]

Інтернет медичних речей застосовується для розв'язання таких завдань:

- проектування та впровадження носимих і портативних пристроїв, здатних у дистанційному режимі передавати інформацію про фізіологічні показники пацієнтів медичному персоналу;
- контролю виконання замовлень на постачання лікарських засобів, а також відстеження місцезнаходження пацієнтів, які перебувають у медичних установах;
- організації віддаленого спостереження за станом осіб із хронічними або тривалими захворюваннями.

Подібно до загальної концепції Інтернету речей, сьогодні можливості практичного використання ІоМТ значно розширилися. Це зумовлено широким розповсюдженням мобільних пристроїв, оснащених вбудованими засобами бездротового зв'язку, що забезпечують ефективний обмін даними між медичними пристроями та інформаційними системами.

1.4. Огляд та аналіз існуючих систем і технологій дистанційного моніторингу

На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій існує значна кількість пристроїв і систем дистанційного моніторингу стану здоров'я, побудованих на основі концепції Інтернету речей. До таких засобів належать аналізатори серцевого ритму, прилади для вимірювання артеріального тиску, слухові апарати, кардіостимулятори та інші медичні пристрої. Подібні системи довели свою ефективність, зокрема в умовах, коли лікування та медичний нагляд потребують тривалого безперервного контролю комплексу життєво важливих фізіологічних параметрів [4].

У роботі [11] запропоновано модель системи дистанційного моніторингу основних показників здоров'я людини, зокрема пульсу, артеріального тиску, температури тіла та параметрів дихання. Для передавання даних у цій системі використано бездротову технологію ZigBee. Основним обмеженням запропонованого підходу є його орієнтація виключно на пацієнтів, які перебувають на стаціонарному лікуванні, що суттєво звужує сферу його практичного застосування.

У публікації [12] представлено систему моніторингу стану здоров'я на базі смартфонів. Компактний енергоефективний модуль реєстрації біосигналів забезпечував вимірювання електрокардіограми (ЕКГ), фотоплетизмограми (ФПГ), температури тіла, рівня насичення крові киснем, енергетичних витрат та даних про місцезнаходження користувача (рис. 1.4). Інформація від сенсорів передавалася на смартфон за допомогою технології Bluetooth, після чого надсилалася на віддалений сервер медичного закладу через мережі 3G/4G або Wi-Fi. Сервер забезпечував можливість одночасного моніторингу кількох користувачів у режимі реального часу. У разі потреби відображалися розширені дані, зокрема графічні представлення сигналів ЕКГ і ФПГ. Для підвищення ефективності передавання інформації було реалізовано механізми стиснення даних та базовий алгоритм корекції помилок.

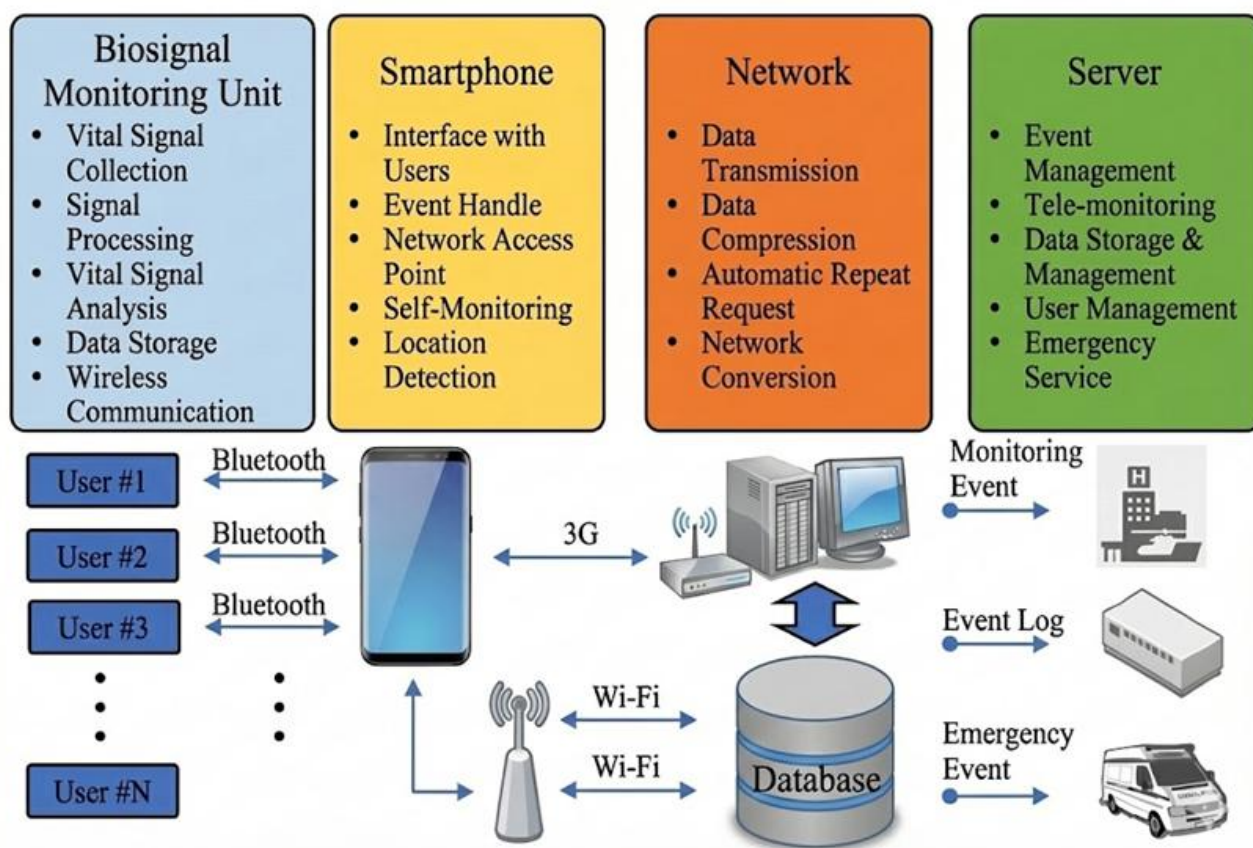


Рис. 1.4. Структурна модель мобільної системи моніторингу стану здоров'я на основі смартфона [12]

У роботі [13] запропоновано підхід до розробки методів і засобів попередження водіїв про їхній фізіологічний стан у процесі керування

транспортним засобом, який може становити загрозу безпеці дорожнього руху. Для реалізації такого підходу використовуються сенсори, вбудовані в сучасні носимі мобільні пристрої, зокрема смарт-годинники та фітнес-браслети (рис. 1.5). Оцінювання фізіологічного стану водія здійснюється шляхом безперервного аналізу ключових показників, серед яких рівень насичення крові киснем, частота серцевих скорочень і температура тіла.

Отримані фізіологічні дані обробляються із застосуванням інтелектуальних алгоритмів та передаються на сервер для зберігання й подальшого використання. Це забезпечує можливість аналізу динаміки показників у часі, що є важливим для потреб медичних установ і страхових компаній. Водночас суттєвим обмеженням цієї системи є неможливість заміни або модернізації окремих сенсорів для вимірювання фізіологічних параметрів без повної заміни мобільного пристрою, на базі якого реалізовано систему.

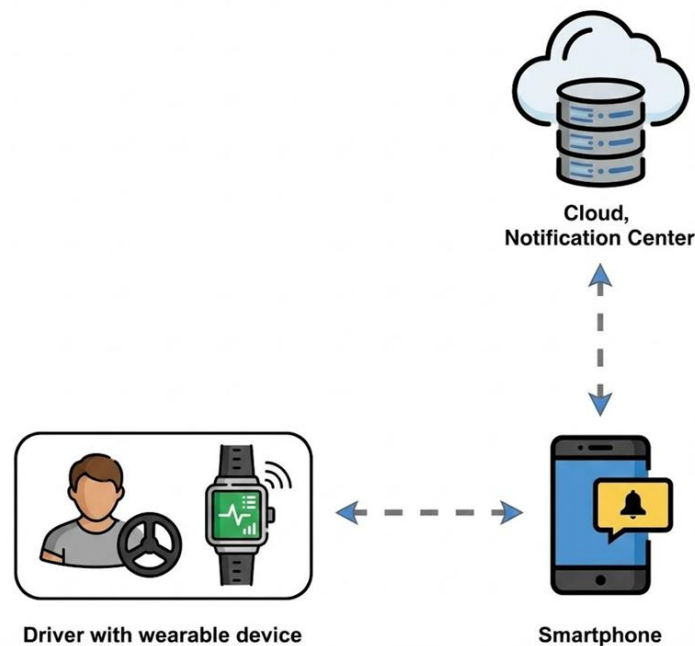


Рис. 1.5. Структурна модель системи моніторингу фізіологічних показників водія [13]

У публікації [14] представлено нову інтегровану систему телемоніторингу, призначену для забезпечення взаємодії між пацієнтами та медичними працівниками. Запропоноване рішення базується на інноваційному використанні технології Smart TV як інтерфейсу комунікації між пацієнтом і постачальниками медичних послуг (рис. 1.6). За твердженням авторів, розроблена архітектура є

універсальною та може бути адаптована для широкого спектра завдань у сфері охорони здоров'я — від дистанційного контролю перебігу хронічних захворювань до реагування на надзвичайні ситуації, зокрема природні катастрофи, а також для організації телеконсультацій.

Водночас на момент публікації дослідження запропонована система перебувала на концептуальному рівні та не була впроваджена в практичну експлуатацію, що обмежує можливість оцінювання її ефективності в реальних умовах.

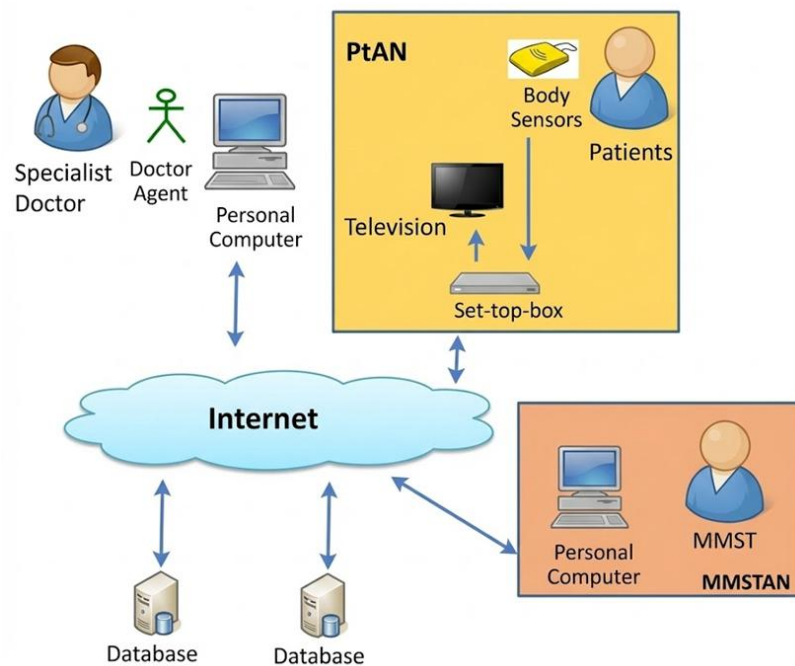


Рис. 1.6. Структурна схема взаємодії основних компонентів системи телемоніторингу на основі технології Smart TV [14]

У публікації [15] представлено систему дистанційного контролю температури тіла людини, реалізовану на базі апаратної платформи Arduino з використанням GSM-модуля (рис. 1.7). Запропоноване рішення забезпечує безперервне вимірювання температури, відображення поточного значення на LCD-дисплеї та його порівняння з наперед заданим порогом. У разі перевищення допустимого значення система автоматично формує та надсилає SMS-повідомлення на мобільний телефон користувача за допомогою GSM-модуля SIM800C.

Основними обмеженнями цієї системи є контроль лише одного фізіологічного параметра, а також відсутність механізмів довготривалого збереження та аналізу результатів вимірювань, що звужує можливості її використання для комплексного моніторингу стану здоров'я.

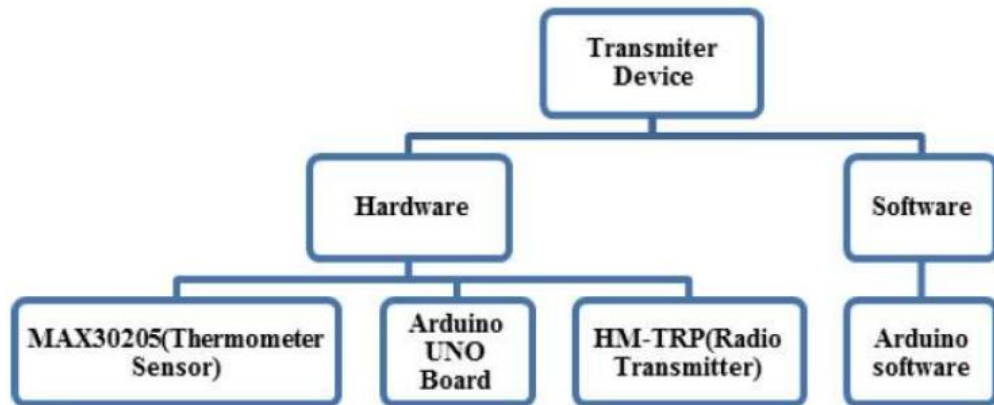


Рис. 1.7. Функціональна структура системи віддаленого контролю температури тіла людини [15]

У дослідженні [16] розглянуто подібну систему дистанційного моніторингу стану здоров'я, яка забезпечує збирання даних про артеріальний тиск пацієнта за допомогою смартфона з подальшим передаванням і візуалізацією отриманої інформації для лікарів через веб-інтерфейс (рис. 1.8).

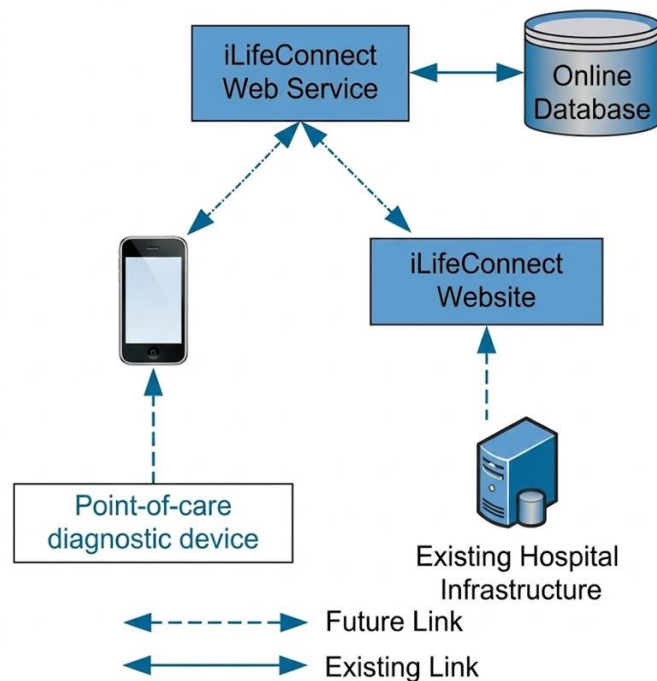


Рис. 1.8. Структурна модель системи дистанційного моніторингу стану здоров'я [16]

У дослідженні [17] представлено реалізацію системи контролю стану пацієнтів, архітектура якої включає три основні компоненти: Smart TV, мобільний застосунок та вебсервіс (рис. 1.9). Запропонована система забезпечує збір і накопичення важливих медичних даних про пацієнтів, надаючи лікарям можливість доступу до них для подальшого аналізу з метою встановлення діагнозу та визначення методів дистанційного лікування.

Інтероперабельність із іншими інформаційними системами досягається завдяки використанню платформи Open m-Health, яка призначена для стандартизованого отримання, зберігання та візуалізації медичних даних.

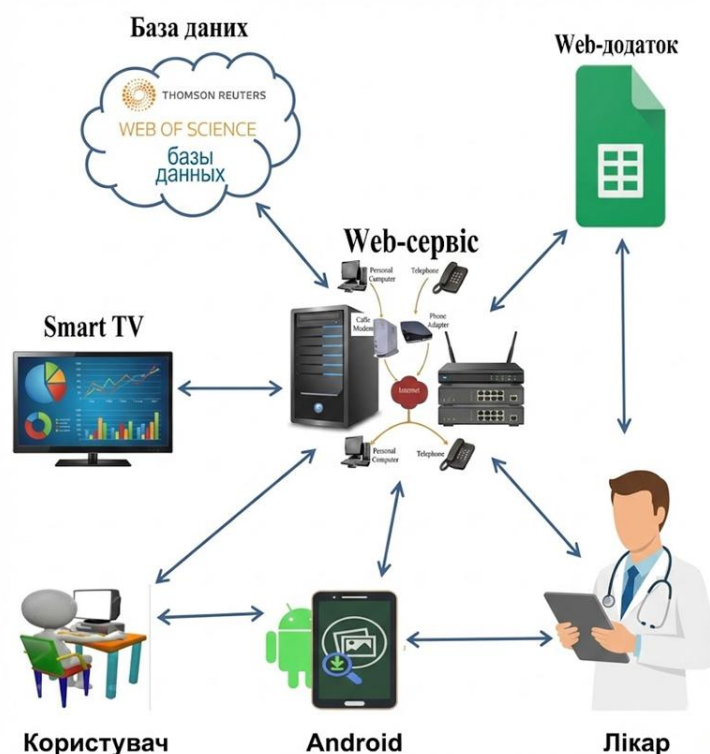


Рис. 1.9. Архітектура електронної системи дистанційного моніторингу стану здоров'я пацієнтів [4]

Огляд існуючих систем моніторингу здоров'я

Смарттехнології надають можливість здійснювати безперервний контроль показників здоров'я в режимі реального часу, що суттєво спрощує процес діагностики та лікування різноманітних захворювань.

В умовах зростання кількості хвороб і поширення вірусних інфекцій сучасне суспільство потребує ефективних та інноваційних рішень у сфері медичної діагностики. Саме такі можливості забезпечують IoT-системи

моніторингу здоров'я. Вони дозволяють постійно відстежувати фізіологічний стан пацієнтів, своєчасно виявляти відхилення та надавати персоналізовану медичну допомогу.

ІоТ-системи моніторингу здоров'я можуть бути класифіковані за різними критеріями, зокрема за типом зібраних даних, місцем перебування пацієнта та способом передавання інформації.

За типом даних:

Системи моніторингу життєво важливих показників організму.

Такі системи використовують спеціалізовані сенсори для контролю основних фізіологічних параметрів. Одними з найбільш поширених є датчики серцевого ритму, які застосовуються для вимірювання серцевої активності та виявлення потенційних порушень у роботі серця. Прикладом таких пристроїв є PPG-датчики (Photoplethysmography) (рис. 1.10), що широко використовуються у фітнес-браслетах і розумних годинниках [11].

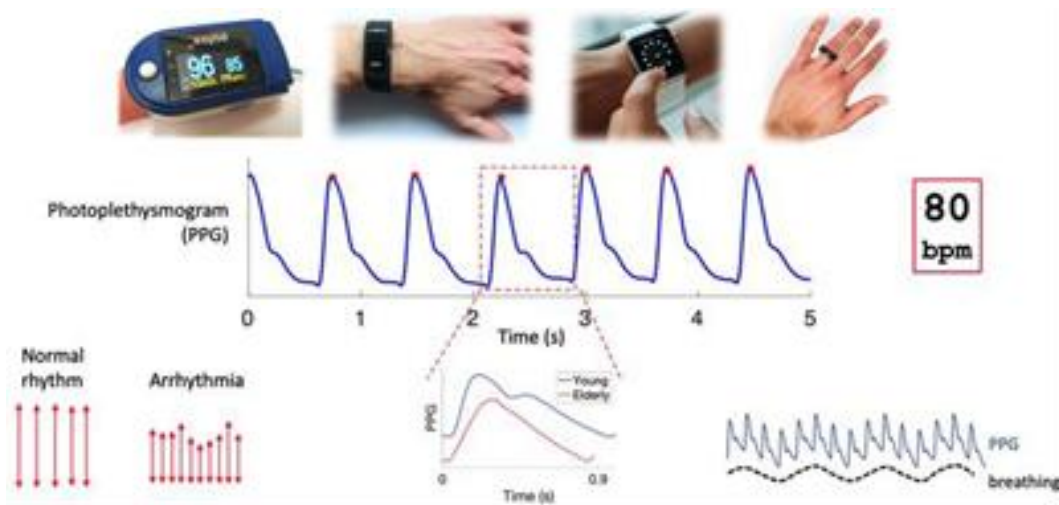


Рис. 1.10. Датчик PPG (Photoplethysmography)

Датчики артеріального тиску забезпечують можливість контролю кров'яного тиску пацієнтів у режимі реального часу. Вони можуть бути вбудовані як у носимі пристрої, так і в окремі медичні прилади. Прикладом такого рішення є Omron HeartGuide (рис. 1.11), який використовує технологію надувної манжети для забезпечення високої точності вимірювання артеріального тиску [11].



Рис. 1.11. Датчик Omron HeartGuide

Глюкометри застосовуються для постійного відстеження рівня глюкози в крові. Прикладом є системи Dexcom (рис. 1.12), які використовують технології IoT для збору показників і передачі даних на смартфони або інші цифрові пристрої. Це надає можливість пацієнтам із цукровим діабетом здійснювати контроль свого стану здоров'я в режимі реального часу [13].



Рис. 1.12. Система Dexcom

Пульсоксиметри призначені для вимірювання рівня насичення крові киснем і широко застосовуються для спостереження за станом пацієнтів із респіраторними захворюваннями. Такі сенсори можуть бути вбудовані у фітнес-браслети або використовуватися як окремі медичні пристрої. Зокрема, модель Fitbit Sense (рис. 1.13) оснащена вбудованим датчиком SpO₂, який забезпечує вимірювання рівня кисню в крові [14].



Рис. 1.13. Система Fitbit Sense

Датчики температури тіла надають можливість контролювати температурні показники пацієнтів та своєчасно виявляти ознаки лихоманки. Прикладом такого пристрою є iHealth Thermometer PT3 (рис. 1.14), у якому застосовуються інфрачервоні сенсори для безконтактного вимірювання температури тіла [15].



Рис. 1.14. Система iHealth Thermometer PT3

Системи моніторингу фізичної активності призначені для відстеження рівня рухової активності користувачів, зокрема кількості пройдених кроків, витрачених калорій і якості сну [3,4]. До таких систем належать фітнес-трекери, зокрема Fitbit та Apple Watch (рис. 1.15), які використовують IoT-технології для контролю фізичної активності, сну, серцевого ритму та інших показників здоров'я. Зібрані дані передаються до мобільних додатків, де користувачі мають змогу аналізувати власні фізіологічні показники [12].



Рис. 1.15. Система Fitbit та Apple Watch

Системи моніторингу психічного здоров'я орієнтовані на збір інформації про психологічний стан пацієнтів, зокрема показники настрою, рівень тривожності та якість сну [5,6].

За місцем перебування пацієнта:

Системи домашнього моніторингу застосовуються для дистанційного спостереження за станом пацієнтів (Remote Patient Monitoring, RPM), що надає можливість лікарям контролювати показники здоров'я на відстані з використанням IoT-пристроїв. Прикладом є система HealthPatch MD (рис. 1.16) компанії VitalConnect, яка включає носимий сенсор для вимірювання серцевого ритму, частоти дихання, температури тіла та інших фізіологічних параметрів. Отримані дані передаються на медичні платформи для подальшого аналізу та підтримки клінічних рішень [4].



Рис. 1.16. HealthPatch MD

Інтелектуальні інгалятори, зокрема система Propeller Health (рис. 1.17), використовують IoT-технології для контролю застосування інгаляторів

пацієнтами, які страждають на астму або хронічну обструктивну хворобу легень (ХОЗЛ). Інформація про використання інгалятора передається до мобільного додатка, що дозволяє як пацієнтам, так і лікарям оцінювати ефективність терапії та виявляти чинники, які провокують загострення симптомів.



Рис. 1.17. Система Propeller Health

Системи стаціонарного моніторингу застосовуються в лікарнях та інших закладах охорони здоров'я з метою забезпечення безперервного контролю стану пацієнтів, управління медичним обладнанням і підвищення рівня комфорту пацієнтів. Системи моніторингу життєво важливих показників, зокрема Philips IntelliVue (рис. 1.18), інтегруються з різними датчиками та медичними пристроями, надаючи лікарям і медичному персоналу актуальну та достовірну інформацію про стан пацієнтів у режимі реального часу [16].



Рис. 1.18. Система Philips IntelliVue

За способом передавання даних:

Залежно від способу передавання інформації системи моніторингу здоров'я поділяються на два основні типи: дротові та бездротові. Дротові системи функціонують на основі кабельного з'єднання, через яке здійснюється передавання даних. Бездротові системи, своєю чергою, використовують бездротові канали зв'язку та забезпечують обмін інформацією за допомогою таких технологій, як Bluetooth, Wi-Fi, мобільний або супутниковий зв'язок.

Компоненти IoT-систем моніторингу здоров'я

IoT-системи моніторингу здоров'я, як правило, складаються з таких основних компонентів:

Датчики — призначені для збору інформації про фізіологічні показники пацієнта. Вони можуть бути носимими, імплантованими або розміщеними в навколишньому середовищі пацієнта [14,15].

Пристрій зв'язку — забезпечує передавання даних від датчиків до хмарної платформи. Такий пристрій може бути інтегрований безпосередньо в сенсор або виконувати функцію окремого модуля [16].

Хмарна платформа — відповідає за зберігання, обробку, аналіз та візуалізацію даних, отриманих із датчиків. Окрім цього, хмарна інфраструктура може формувати попереджувальні сигнали та повідомлення для медичного персоналу у разі виявлення відхилень у стані здоров'я пацієнта [17,18].

Користувацький інтерфейс — надає медичним працівникам і пацієнтам доступ до інформації про стан здоров'я та можливість керування системою. Інтерфейс може бути реалізований у вигляді вебзастосунку, мобільного додатка або настільного програмного забезпечення [19,20].

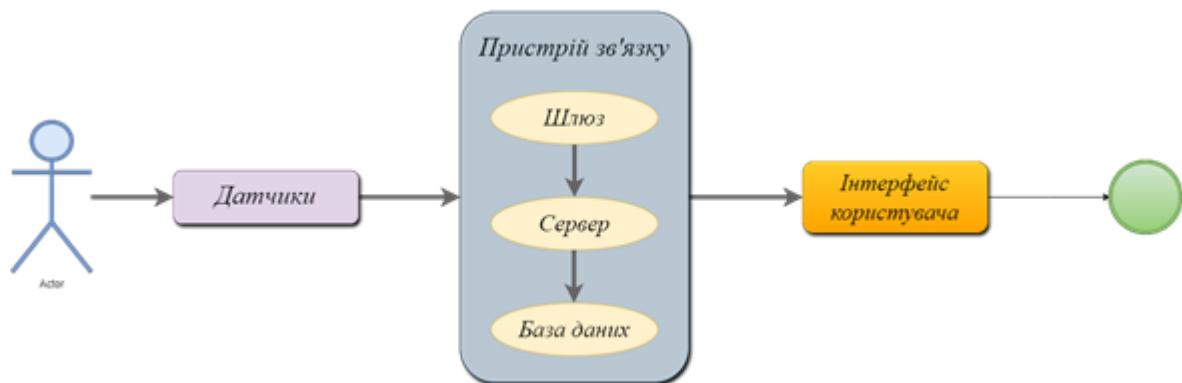


Рис. 1.19. Система моніторингу здоров'я на основі IoT

Існуючі системи моніторингу здоров'я мають низку суттєвих переваг, що відкриває нові можливості для сучасної медицини, зокрема щодо раннього виявлення захворювань. Постійний контроль фізіологічних показників дозволяє своєчасно фіксувати аномальні зміни у стані пацієнтів, що сприяє ранній діагностиці та оперативному початку лікування.

Завдяки збору та аналізу великих обсягів даних стає можливим впровадження персоналізованих підходів до лікування, які враховують індивідуальні особливості кожного пацієнта.

Автоматизація процесів моніторингу та обробки медичних даних підвищує ефективність надання медичних послуг і зменшує навантаження на медичний персонал, дозволяючи зосередитися на безпосередньому лікуванні пацієнтів.

Використання IoT-технологій також сприяє зниженню витрат на госпіталізацію та тривале лікування за рахунок дистанційного спостереження та своєчасного виявлення захворювань.

Таким чином, IoT-системи моніторингу здоров'я відіграють важливу роль у розвитку сучасної медицини, забезпечуючи безперервний контроль стану пацієнтів, ранню діагностику, персоналізоване лікування та підвищення якості медичних послуг. Попри наявність низки викликів, зокрема питань безпеки даних, інтероперабельності та масштабованості, технології IoT мають значний потенціал для подальшого розвитку й активного впровадження у медичну практику. Ключовим чинником успішної інтеграції IoT у сферу охорони здоров'я є розробка надійних технологічних рішень і стандартів, що гарантують безпеку, конфіденційність і сумісність медичних інформаційних систем.

Висновки до розділу

Аналіз наукової літератури показав, що дистанційний моніторинг фізіологічних показників є ключовим елементом сучасної медицини. Він забезпечує ефективну діагностику складних захворювань, контроль стану пацієнтів після тривалого лікування, запобігання ускладнень після хірургічних втручань та оцінку результативності лікувальних методів. Водночас у більшості медичних установ тривале спостереження за пацієнтами на практиці не

реалізується через обмежену наявність спеціалізованого обладнання та програмного забезпечення для дистанційного моніторингу. Новітні технології в сфері Інтернету медичних речей, бездротових комунікацій та мініатюрних високоточних сенсорів створюють можливості для вирішення цих проблем і відкривають перспективи підвищення якості медичного обслуговування.

Слід зазначити, що розглянуті системи моніторингу стану здоров'я базуються на контролі основних фізіологічних показників пацієнта. До них належать частота серцевих скорочень, артеріальний тиск, рівень глюкози в крові, параметри дихальної активності та інші важливі життєві функції.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

2.1. Методи віддаленого моніторингу функціонального стану організму людини

На рисунку 2.1 наведено функціональну схему системи, призначеної для реалізації методу контролю стану здоров'я пацієнтів із можливістю віддаленого моніторингу. Розроблювана система має багаторівневу архітектуру та складається з апаратної частини, серверного рівня і клієнтського інтерфейсу. Вона спрямована на створення зручного й ефективного інструменту для моніторингу стану здоров'я людини.

До складу проєктованої системи входять такі основні компоненти:

- давачі для реєстрації фізіологічних показників людини;
- мікроконтролер;
- Wi-Fi-модуль;
- Bluetooth-модуль;
- IoT-шлюз;
- IoT-сервер;
- програмний додаток для відображення та аналізу результатів моніторингу.

Передбачається, що система працюватиме в таких режимах:

- безпосередня передача даних на IoT-сервер через Wi-Fi-модуль;
- передача даних із використанням технології Bluetooth через IoT-шлюз, роль якого може виконувати смартфон.

Ключовим елементом отримання інформації про контрольовані параметри стану здоров'я в розроблюваній системі моніторингу є мініатюрні давачі, що забезпечують безперервний та неінвазивний збір фізіологічних даних.

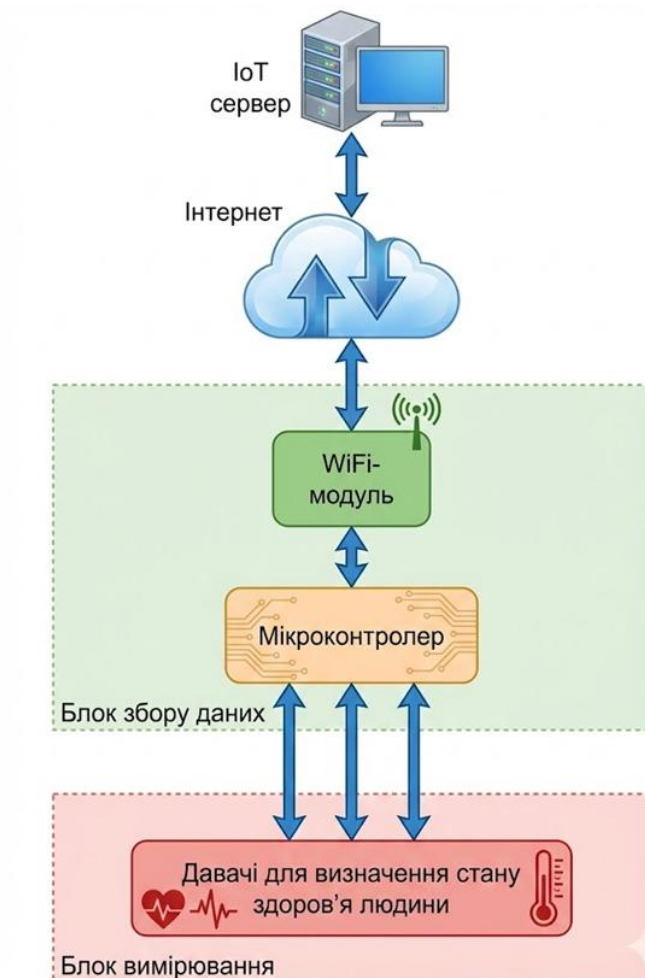


Рис. 2.1. Функціональна схема системи віддаленого моніторингу стану здоров'я людини

Сутність методу дистанційного контролю стану здоров'я людини полягає в такому. Давачі серцевого ритму та температури тіла, модуль ЕКГ закріплені на тілі користувача, здійснюють вимірювання пульсу й температури, ЕКГ та передають отримані дані на мікроконтролер. Далі мікроконтролер забезпечує надсилання цих даних на віддалений сервер безпосередньо або за допомогою IoT-шлюзу, роль якого може виконувати смартфон.

Модуль має відповідати таким вимогам:

- здійснювати збір даних із датчиків температури тіла та серцевого ритму, модуля ЕКГ, а також виконувати їх попередню фільтрацію;
- передавати результати вимірювань на IoT-сервер із використанням бездротових технологій обміну даними.

Система включає такі основні складові:

- блок давачів, який забезпечує зняття біологічних сигналів за допомогою шкірних електродів та оптичних сенсорів;
- блок обробки, що виконує підсилення й фільтрацію отриманих сигналів, а також визначення параметрів серцевої діяльності, зокрема частоти серцевих скорочень;
- мікроконтролер, призначений для координації роботи всіх компонентів системи;
- блок відображення, який використовується для виведення результатів вимірювань на екран;
- модуль зв'язку, що забезпечує передачу даних на смартфон або персональний комп'ютер із використанням Bluetooth, Wi-Fi чи інших бездротових технологій;
- мобільний додаток, який приймає дані з модуля зв'язку, відображає показники стану здоров'я, зберігає історію вимірювань і надає інструменти для аналізу отриманої інформації.

Система орієнтована на використання бездротового каналу зв'язку для передавання інформації від розроблюваного пристрою до смартфона, при цьому збір даних про показники серцевої діяльності користувача здійснюється в режимі реального часу.

На рисунку 2.2 подано структурну схему модуля, призначеного для дистанційного контролю стану здоров'я людини охоплює такі основні елементи:

- давач серцевого ритму, призначений для вимірювання пульсу, який може розташовуватися безпосередньо на шкірі або бути інтегрованим у спеціальний зап'ястний ремінець;
- модуль реєстрації ЕКГ, оснащений електродами, що контактують із тілом і забезпечують знімання електричних сигналів, які генерує серце;
- платформа ESP32, що виконує обробку даних, отриманих від давача серцевого ритму та модуля ЕКГ, і містить вбудований

мікроконтролер, пам'ять, інтерфейси зв'язку та інші необхідні компоненти;

- OLED-дисплей, який використовується для візуалізації результатів моніторингу та взаємодіє з мікроконтролером ESP32 через інтерфейс I2C;
- автономне джерело живлення (акумулятор або батарея), що забезпечує енергопостачання всієї системи, має компактні розміри та здатне гарантувати тривалу роботу пристрою без частого заряджання або заміни.

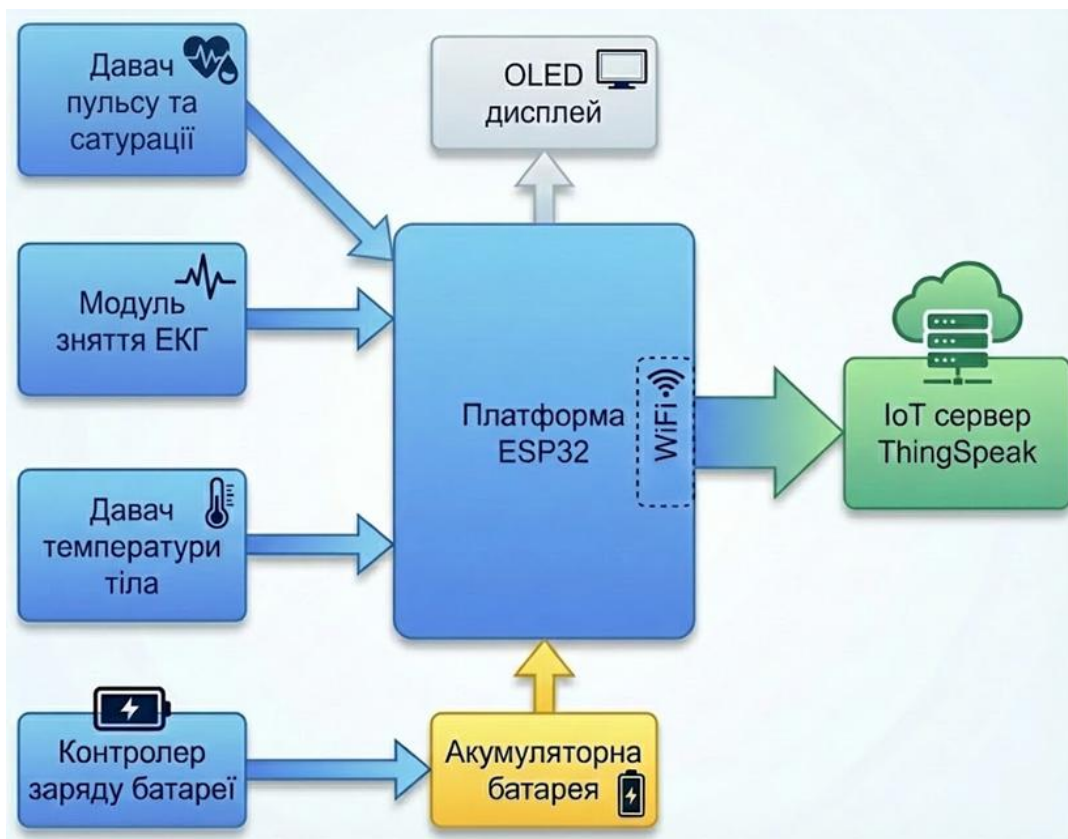


Рис. 2.2. Структурна схема модуля для віддаленого контролю стану здоров'я людини

Усі зазначені компоненти функціонують у взаємозв'язку, забезпечуючи збирання, обробку, звукове сповіщення та візуалізацію даних про показники серцевої діяльності людини. За потреби структурна схема може бути доповнена або модифікована відповідно до конкретних вимог до функціональних можливостей системи.

2.2. Методи та апаратні засоби вимірювання фізіологічних параметрів стану здоров'я людини

2.2.1. Опис платформи ESP32 WROOM

При проєктуванні автоматизованої системи моніторингу стану людини одним із ключових аспектів є обґрунтований вибір апаратних компонентів, оскільки від цього безпосередньо залежить функціональність, ефективність та надійність системи. Для забезпечення комплексного контролю параметрів середовища, таких як температура тіла, серцевого ритму, ЕКГ та інші, необхідно створити платформу, здатну до стабільного збору, обробки та передачі даних у режимі реального часу.

Апаратна архітектура системи будується на базі взаємопов'язаних компонентів, які забезпечують точність вимірювань, надійність передачі даних та автономність роботи. Основні критерії при виборі складових включають енергоефективність, стійкість до різноманітних умов експлуатації та адаптивність до різних сценаріїв використання. До складу системи входять: мікроконтролер або одноплатний комп'ютер для обробки даних, набір сенсорів для фіксації ключових параметрів стану людини, модулі бездротового зв'язку та джерела живлення, оптимізовані для тривалої автономної роботи. Кожен компонент підбирається таким чином, щоб забезпечити безперебійну роботу системи, мінімізувати втручання людини та максимізувати корисність зібраної інформації для оперативного прийняття рішень.

Особливу увагу слід приділити вибору апаратної платформи, яка виконуватиме роль ядра системи моніторингу. Ефективність збору, обробки та передачі даних значною мірою визначається характеристиками обраного контролера чи комп'ютера. Для IoT-рішень зазвичай застосовують мікроконтролери або одноплатні комп'ютери, тому критеріями їх порівняння є продуктивність, енергоспоживання, надійність та можливість інтеграції з іншими компонентами системи. У результаті аналізу доступних апаратних платформ обирається оптимальна конфігурація, що забезпечує реалізацію високоефективної системи моніторингу стану людини.

Arduino є однією з найпопулярніших платформ для розробки електронних проектів та прототипів. Вона характеризується широким набором доступних бібліотек і модулів для роботи з різними сенсорами, що спрощує інтеграцію периферійних пристроїв.

Однак Arduino не має вбудованих можливостей для бездротового зв'язку, тому для підключення до мереж Wi-Fi або Bluetooth необхідно використовувати додаткові модулі, такі як ESP8266 або HC-05. Це ускладнює апаратну архітектуру системи, знижує її компактність та енергоефективність порівняно з іншими платформами.

Raspberry Pi – це одноплатний комп'ютер із високою обчислювальною потужністю, що дозволяє запускати повноцінні операційні системи (наприклад, Linux) та реалізовувати складніші функціональні можливості, включно з обробкою й зберіганням великих обсягів даних. Незважаючи на це, його значні розміри, висока вартість та підвищене енергоспоживання обмежують застосування в автономних системах моніторингу на віддалених пасіках без постійного джерела живлення.

ESP8266 є економічним та менш потужним мікроконтролером у порівнянні з ESP32, однак володіє вбудованим модулем Wi-Fi, що робить його зручним для простих IoT-проектів. Основними перевагами є доступність та легкість інтеграції. Водночас відсутність Bluetooth та обмежена обчислювальна потужність знижують ефективність ESP8266 у складних системах, що потребують одночасної обробки даних із численних сенсорів.

ESP32 є однією з найпопулярніших платформ для розробки IoT-систем завдяки двоядерному процесору, що забезпечує високопродуктивну паралельну обробку даних. Вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth дозволяють організувати бездротову передачу даних без необхідності додаткових компонентів, забезпечуючи інтеграцію з віддаленими серверами та мобільними додатками. Низьке енергоспоживання робить ESP32 оптимальним для автономних систем, що працюють від акумуляторів. Крім того, наявність різноманітних периферійних інтерфейсів (I2C, SPI, UART) дозволяє підключати широкий

спектр сенсорів для моніторингу температури, вологості, ваги та інших параметрів бджолиних вуликів.

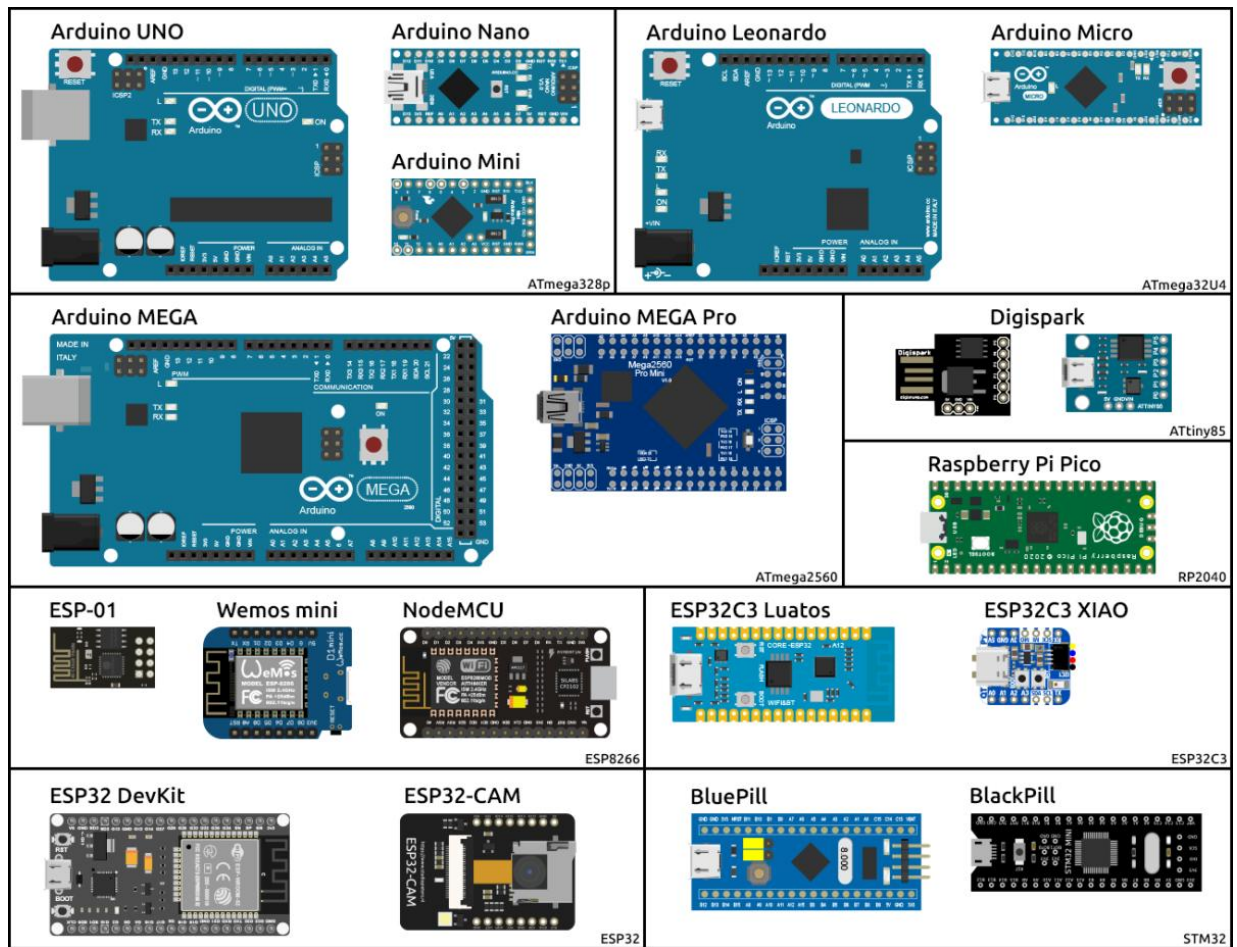


Рис. 2.3. Платформи для розробки електронних проєктів

За результатами порівняльного аналізу наявних на ринку мікроконтролерних модулів для реалізації розроблюваної системи було обрано платформу ESP32 WROOM, зовнішній вигляд якої представлено на рисунку 2.4.

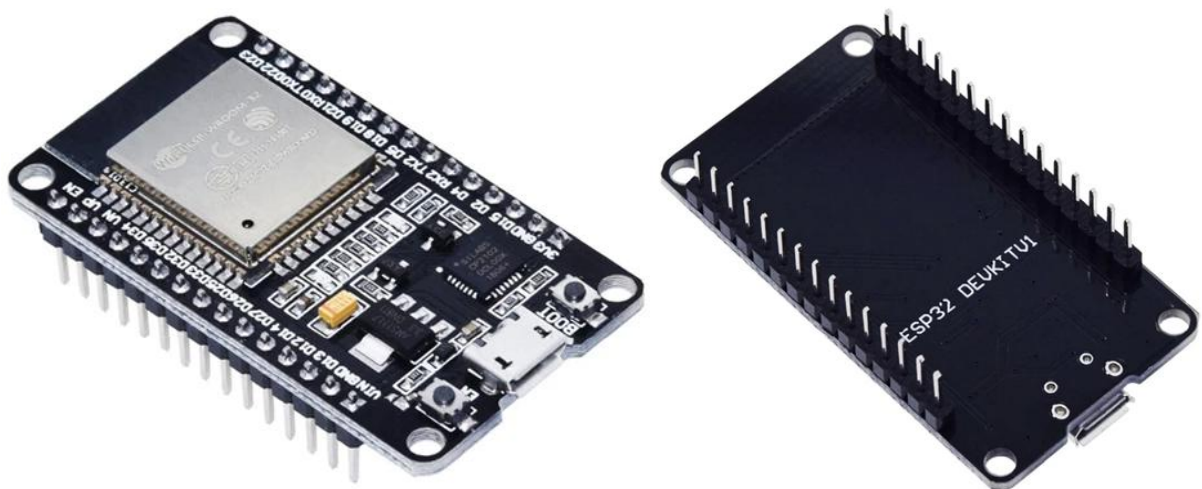


Рис. 2.4. Налагоджувальна плата ESP32-WROOM-32 DevKit V1 Wi-Fi, Bluetooth

ESP32 WROOM — це мікроконтролерна плата, призначена для створення бездротових пристроїв із підтримкою технологій Bluetooth та Wi-Fi. Вона широко застосовується у розробці рішень на основі Інтернету речей, а також у проєктах, пов'язаних зі збором і обробкою даних. Технічні характеристики платформи ESP32 WROOM наведено в таблиці 2.1 [6].

Таблиця 2.1

Характеристики модуля ESP32 DEVKIT

Характеристика	Значення
Напруга живлення	2,2 - 3,6 В
Максимальний струм стабілізатора	800 мА
Діапазон робочих температур	-40 °C - +85 °C
USB-UART конвертер	CP2102
Wi-Fi стандарти	FCC / CE / IC / TELEC / KCC / SRRC / NCC
Протоколи	802.11 b / g / n / d / e / i / k / r
Частотний діапазон	2,4 ~ 2,5 ГГц
Bluetooth протоколи	Bluetooth v4.2 BR / EDR і BLE
Мережеві протоколи	IPv4, IPv6, SSL, TCP / UDP / HTTP / FTP / MQTT
Пам'ять	520 Кб пам'яті SRAM
АЦП	12-розрядний до 18 каналів
ЦАП	8-розрядний 2 канали

Для реалізації проєкту було обрано плату ESP32 DevKit V1, що пояснюється її численними перевагами:

- висока продуктивність і багатоядерна архітектура;
- велика кількість цифрових та аналогових входів/виходів;
- підтримка апаратних протоколів, таких як I2C, UART, SPI;
- можливість живлення через USB або VIN;
- широке використання в середовищі Arduino IDE та наявність великої кількості бібліотек;
- вбудовані таймери, що забезпечують точний контроль часу реального часу та формування ШІМ-сигналів.

Центральним елементом апаратної частини є мікроконтролер ESP32 — високопродуктивна платформа з інтегрованими модулями Wi-Fi та Bluetooth, що широко використовується в системах Інтернету речей. ESP32 оснащений двоядерним процесором Tensilica LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, що забезпечує достатню обчислювальну потужність для паралельної обробки даних, керування периферійними пристроями та організації мережевих з'єднань. Мікроконтролер має до 34 доступних GPIO-виводів, однак частина з них зарезервована для внутрішніх функцій, що необхідно враховувати під час проектування апаратної схеми.

Виводи ESP32 підтримують роботу в режимах цифрового введення та виведення, мають вбудовані аналого-цифрові перетворювачі (ADC), можливість формування широтно-імпульсної модуляції (PWM), а також забезпечують реалізацію основних комунікаційних інтерфейсів, зокрема I2C, SPI та UART. Така функціональна гнучкість дозволяє ефективно інтегрувати різноманітні сенсори, модулі зв'язку та допоміжні пристрої в межах єдиної апаратної платформи.

Блок схема мікроконтролера ESP32 наведена на рисунку 2.5 а структура виводів мікроконтролера ESP32 наведена на рисунку 2.6.

Для живлення периферійних компонентів та самого мікроконтролера передбачено використання виводів 3V3 (номінальна напруга 3,3 В), VIN (вхід живлення 5 В) та GND (загальна шина). Аналого-цифрове перетворення в ESP32 реалізоване за допомогою двох груп каналів — ADC1 та ADC2, особливістю яких є обмеження сумісної роботи з бездротовими інтерфейсами. Зокрема, під час активного використання Wi-Fi задіюється виключно модуль ADC1, тоді як канали ADC2 стають недоступними. До групи ADC1 належать виводи GPIO36, GPIO39, GPIO34, GPIO35, GPIO32 та GPIO33, які забезпечують приймання аналогових сигналів від різних сенсорів, зокрема температурних датчиків, фоторезисторів або інших вимірювальних елементів.

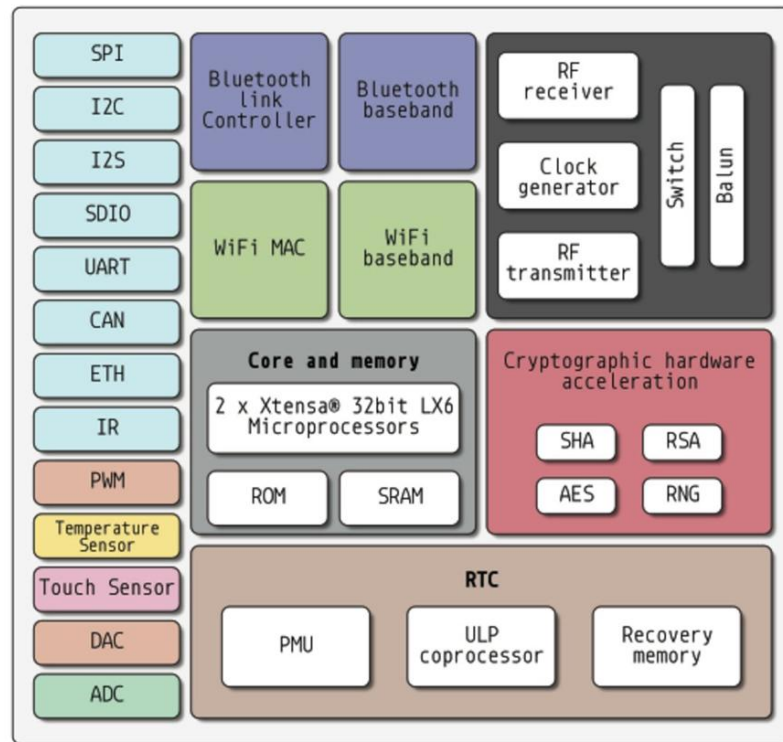


Рис. 2.5. Блок схема мікроконтролера ESP32-WROOM-32 DevKit V1

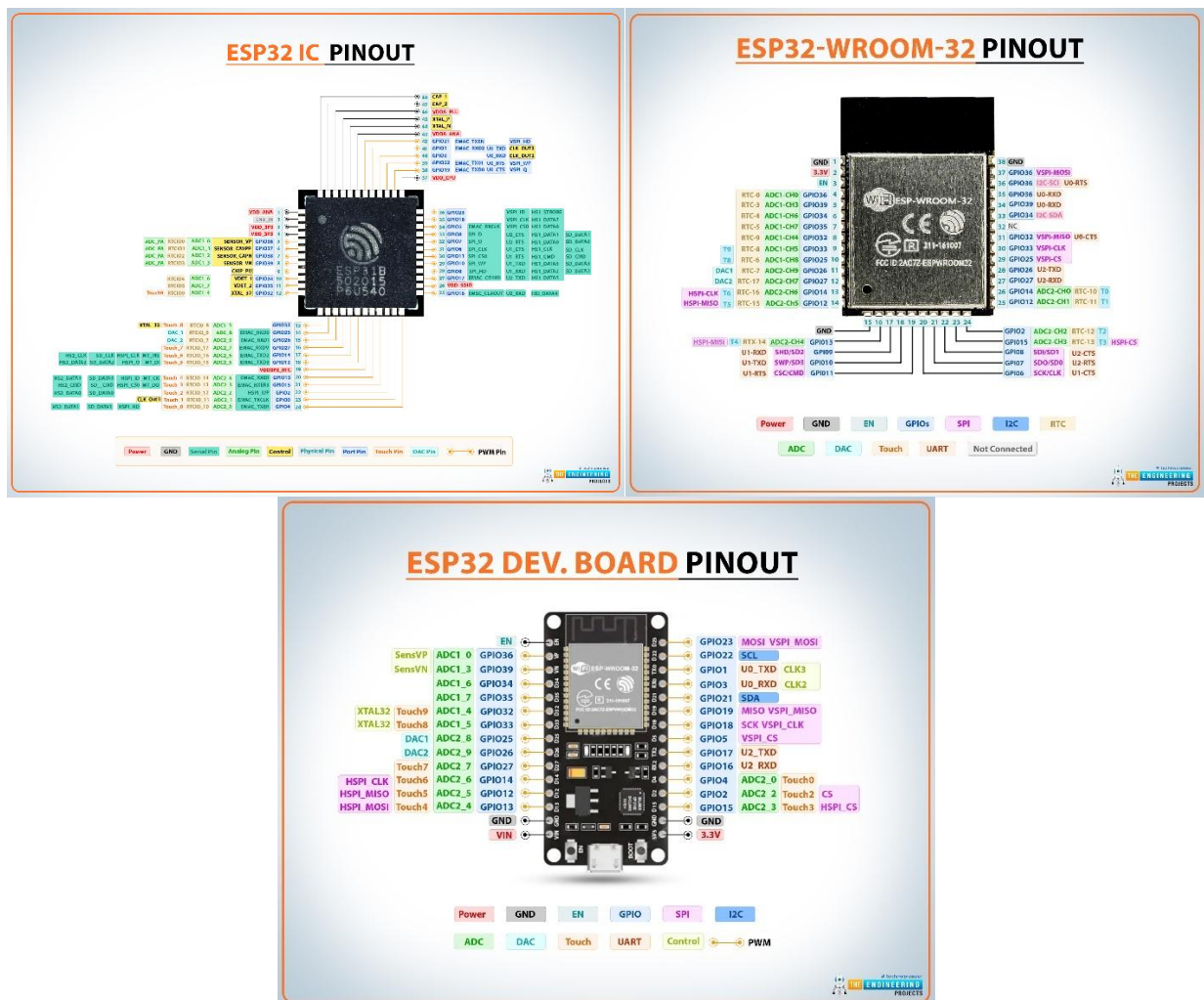


Рис. 2.6. Структура виводів мікроконтролера ESP32-WROOM-32 DevKit V1

Формування широтно-імпульсних сигналів (PWM) у мікроконтролері ESP32 може бути реалізоване практично на будь-якому GPIO-виводі, що надає значну гнучкість під час керування виконавчими пристроями, такими як світлодіоди, сервоприводи, двигуни постійного струму або інші елементи керування.

Принципова схема плати показана на рисунку 2.7.

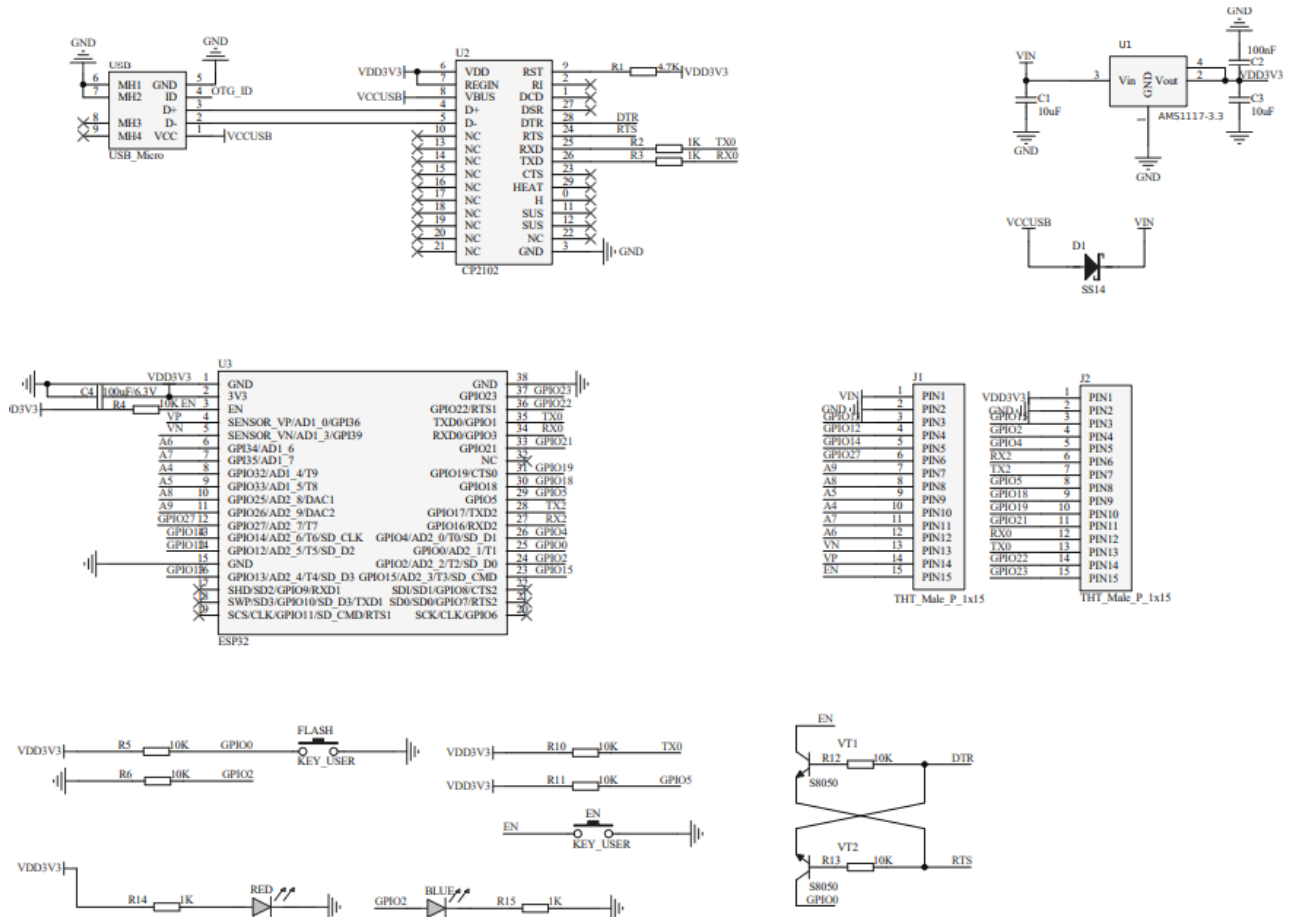


Рис. 2.7. Принципова схема плати ESP32-WROOM-32 DevKit V1

Мікроконтролер ESP32 підтримує широкий спектр комунікаційних протоколів, що суттєво розширює можливості інтеграції зовнішніх модулів. Інтерфейс I2C забезпечує підключення кількох пристроїв через дві сигнальні лінії — SDA (GPIO21) та SCL (GPIO22), що дозволяє мінімізувати кількість задіяних виводів. За допомогою цього інтерфейсу можуть бути підключені, зокрема, сенсор BME280 для вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску, а також графічні OLED-дисплеї.

Для підключення високошвидкісних периферійних пристроїв використовується інтерфейс SPI, який реалізується через виводи GPIO19 (MISO), GPIO23 (MOSI), GPIO18 (SCK) та GPIO5 (CS). Даний інтерфейс застосовується для обміну даними з такими компонентами, як модуль бездротового зв'язку LoRa RA-01 SX1278, SD-карти пам'яті або TFT-дисплеї. Окрім цього, ESP32 оснащений трьома апаратними інтерфейсами UART (UART0, UART1, UART2), що забезпечує можливість організації послідовного зв'язку з GSM-модулями, GPS-приймачами, RFID-зчитувачами та іншими зовнішніми пристроями.

2.2.2. Опис давача пульсу та сатурації MAX30102

MAX30102 є малопотужним давачем із підтримкою інтерфейсу I2C [11]. У його складі використовується сучасна інтегрована мікросхема пульсоксиметра та сенсора серцевого ритму виробництва Analog Devices. Пристрій поєднує фотодетектор, два світлодіоди, оптимізовану оптичну систему та малOSHумну схему обробки аналогових сигналів, що забезпечує точне визначення пульсоксиметричних параметрів і частоти серцевих скорочень.

З одного боку давач оснащений двома світлодіодами — червоним та інфрачервоним, а з іншого розміщено високочутливий фотодетектор. Принцип його роботи ґрунтується на вимірюванні інтенсивності відбитого від тканин людини світла. Отримані фотодетектором дані дають змогу визначати рівень насичення крові киснем і пульс.

Для коректної роботи давач MAX30102 потребує двох рівнів живлення: 1,8 В для мікросхеми та 3,3 В для світлодіодів [11–13]. Зовнішній вигляд давача MAX30102 подано на рис. 2.8.



Рис. 2.8. Зовнішній вигляд давача для вимірювання сатурації та пульсу
MAX30102

Технічні характеристики давача наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Технічні характеристики давача MAX30102 [11]

Назва характеристики	Значення
Блок живлення	3,3 В до 5 В
Струм	600 мкА (під час вимірювань) 0,7 мкА (у режимі очікування)
Довжина хвилі червоного світлодіода	660 нм
Довжина хвилі ІЧ світлодіода	880 нм
Температурний діапазон	Від -40°С до +85°С
Точність температури	± 1°С

Давач MAX30102 здійснює вимірювання частоти серцевих скорочень із використанням методу фотоплетизмографії. У процесі роботи світло від пари високояскравих світлодіодів із довжинами хвиль 660 нм та 880 нм проходить крізь шкіру пальця пацієнта. Під час кожного серцевого скорочення, коли кров циркулює через тканини пальця, інтенсивність відбитого світла змінюється, що призводить до формування змінної хвилі на виході фотодетектора [11]. Принцип дії фотоплетизмографії показано на рис. 2.9.

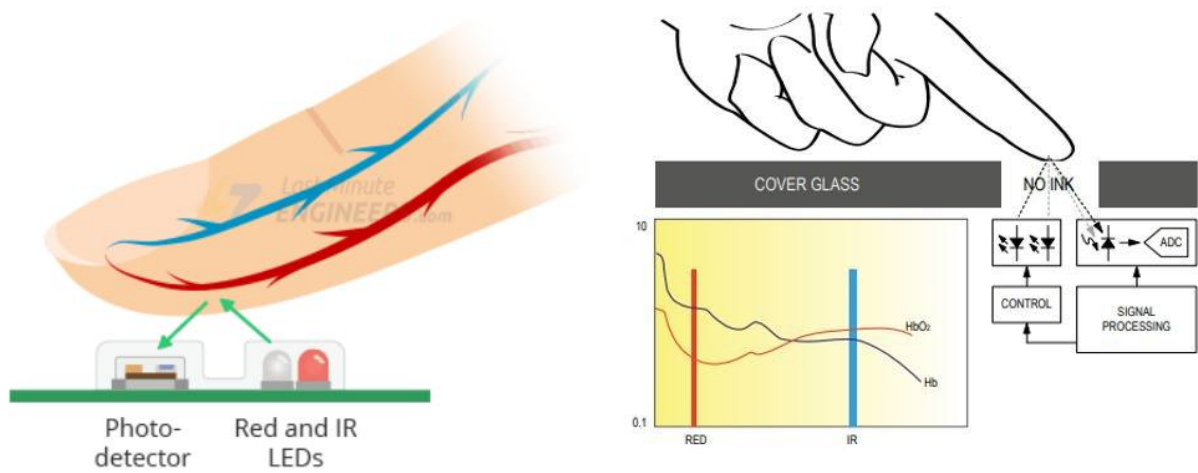


Рис. 2.9. Принцип фотоплетизмографії

Визначення рівня насичення крові киснем ґрунтується на аналогічному принципі, згідно з яким інтенсивність поглинання червоного та інфрачервоного світла змінюється залежно від концентрації кисню в крові. На рисунку 2.10 наведено спектри поглинання оксигенованого гемоглобіну (HbO_2) та деоксигенованого гемоглобіну (Hb).

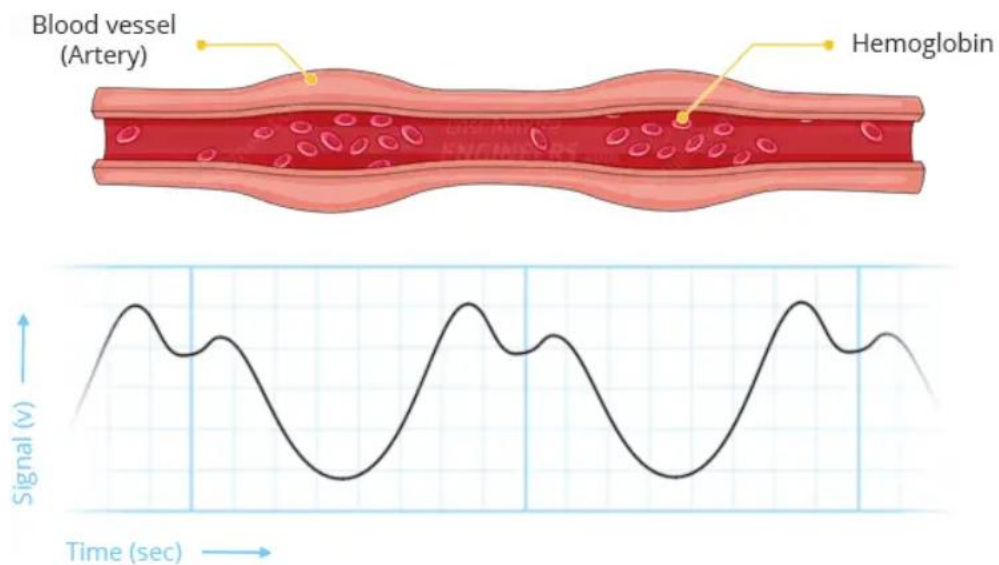


Рис. 2.10. Зміна рівня відбитого світла, спричиненої зміною руху крові судинами в залежності від фази серцевого циклу

Для визначення рівня кисню датчик MAX30102 використовує обидва світлодіоди — червоний та інфрачервоний. Це засноване на різниці поглинання світла:

- Оксигемоглобін (HbO_2) сильніше поглинає інфрачервоне світло (880 нм)

- Дезоксигемоглобін (Hb) сильніше поглинає червоне світло (660 нм)

На наведеному нижче графіку спектра поглинання показано, як оксигенований та дезоксигенований гемоглобін поглинають світло різної довжини з різною швидкістю.

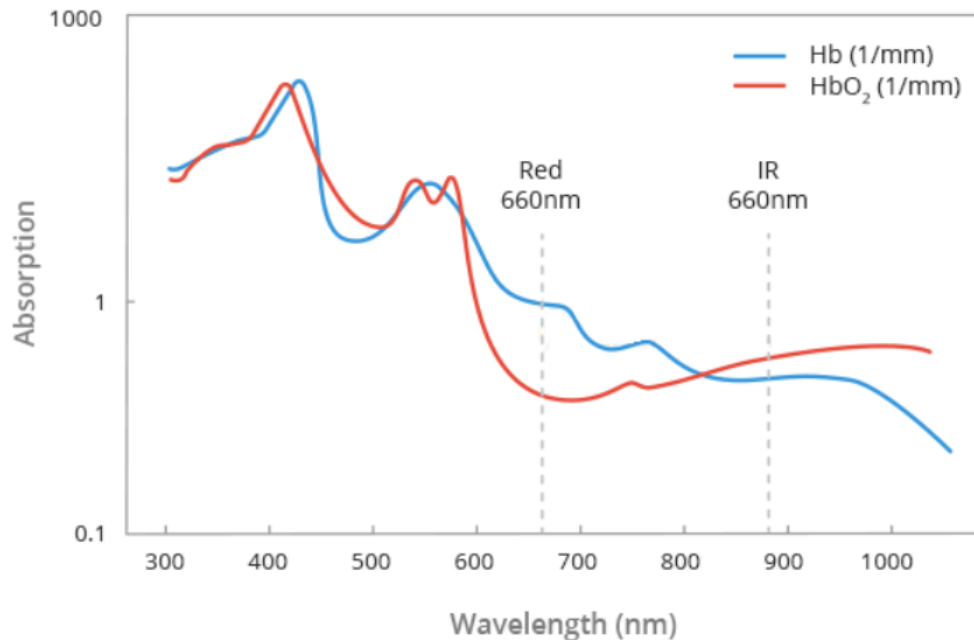


Рис. 2.11. Графік спектра поглинання

Порівнюючи кількість поглиненого червоного та інфрачервоного світла, MAX30102 може розрахувати, який відсоток вашого гемоглобіну переносить кисень. Цей відсоток – ваш рівень SpO2, який показує, наскільки добре насичена киснем кров.

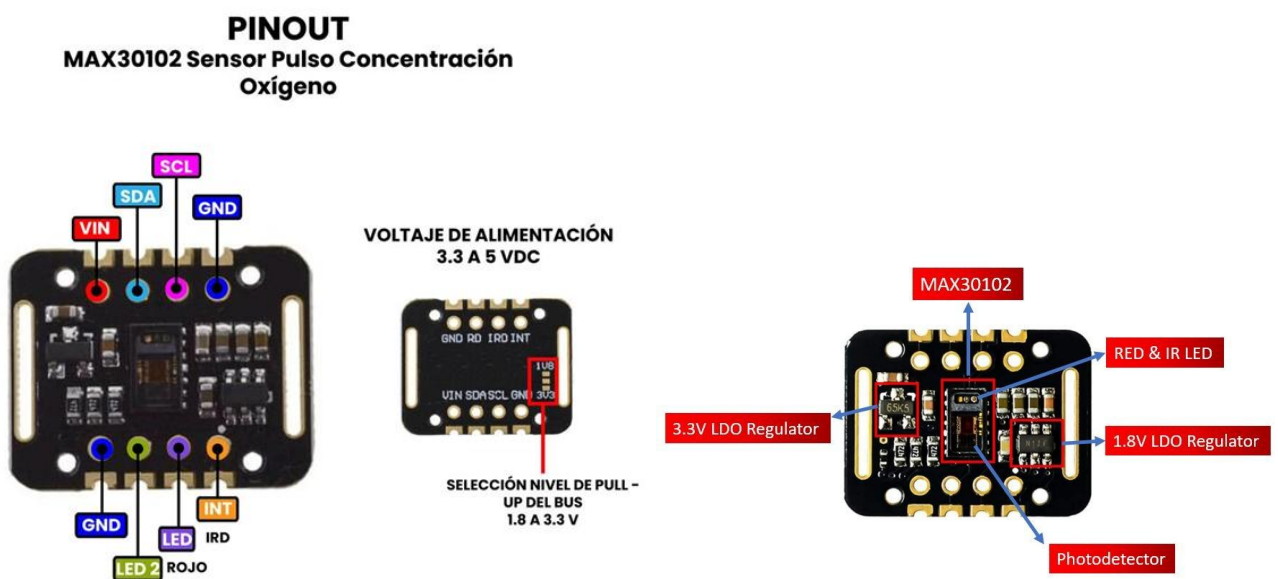


Рис. 2.12. Структура виводів MAX30102

Принципова схема MAX30102 показана на рисунку 2.13.

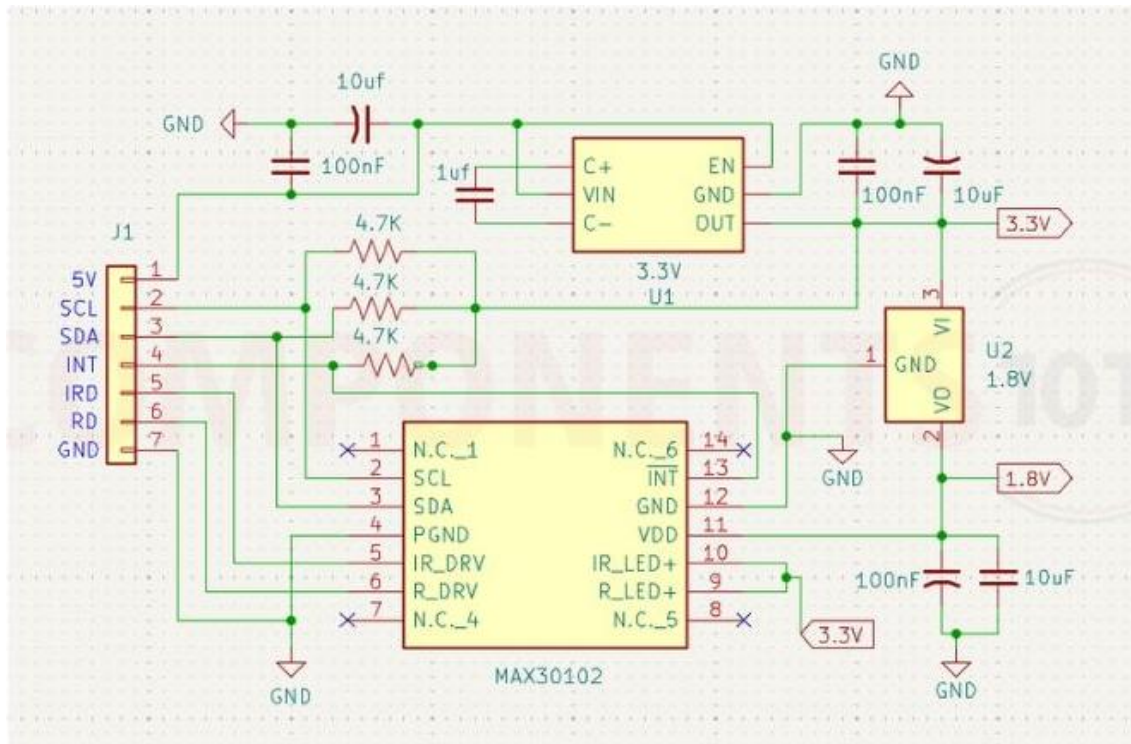


Рис. 2.13. Принципова схема MAX30102

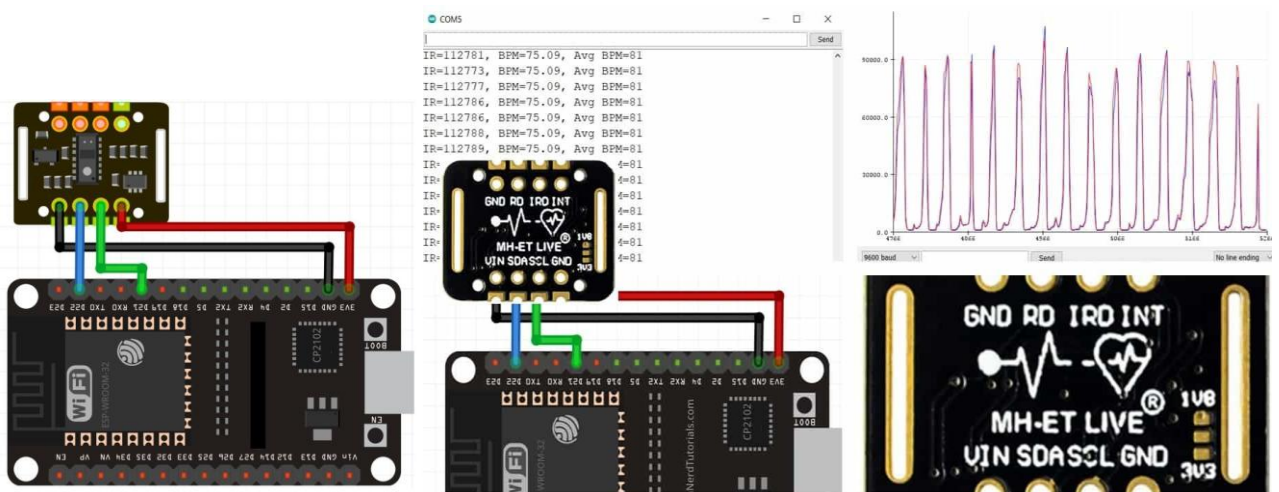


Рис. 2.14. Схема підключення датчика MAX30102 до ESP32-WROOM-32 DevKit V1

2.2.3. Опис модуля AD8232 для зняття електрокардіограми (ЕКГ)

Модуль AD8232 застосовується для отримання та оброблення електромію-та електрокардіо-сигналів, що генеруються серцем, та перетворення їх у відповідні аналогові сигнали, які можна обробляти та аналізувати (рис. 2.15). Він може використовуватись для контролю за станом здоров'я та діагностики серцевих захворювань.

Цей модуль є популярним серед розробників медичних пристроїв, дослідників та ентузіастів, оскільки він надає зручний спосіб отримання сигналів ЕКГ для аналізу та моніторингу серцевої діяльності. Використовуючи цей модуль у поєднанні з відповідним ПЗ та обладнанням, можна здійснювати реалізацію портативних систем моніторингу серцевої діяльності та виконувати дослідження у галузі кардіології.

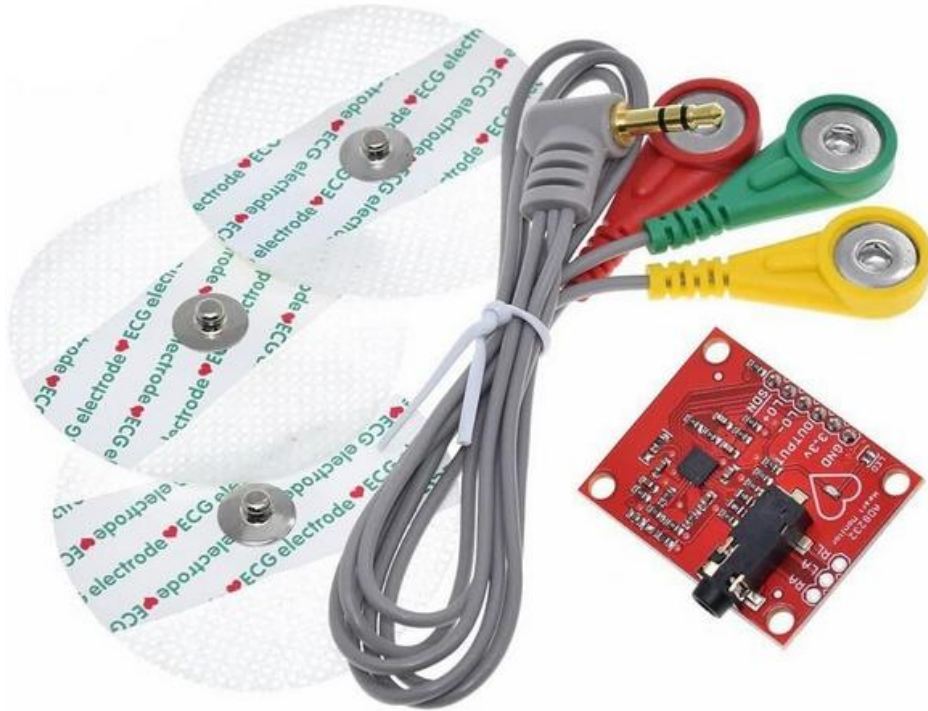


Рис. 2.15. Модуль AD8232 для зняття ЕКГ

Модуль AD8232 вирізняється компактними розмірами та низьким енергоспоживанням у порівнянні з аналогічними пристроями. До комплекту постачання входять набір електродів, плата AD8232 та з'єднувальний кабель [8].

Пристрій оснащений вбудованим високоякісним ізоляційним підсилювачем, який забезпечує знімання ЕКГ-сигналів з електродів, розміщених на поверхні шкіри. Наявні внутрішні фільтри дають змогу зменшувати вплив шумів і спотворень, що виникають під час вимірювань, та формувати чистий електрокардіографічний сигнал. Модуль AD8232 здатний приймати, підсилювати й фільтрувати слабкі біопотенціальні сигнали навіть за умов значних завад.

Технічні характеристики модуля AD8232 наведено в таблиці 2.3.

Технічні характеристики модуля AD8232

Назва параметру	Характеристика
Споживання струму	170 мкА
Напруга живлення	Від 2 до 3.5 В
Кількість відведень ЕКГ	1
Коефіцієнт ослаблення фазового сигналу	80 дБ
Вихідний сигнал	Аналоговий
Фільтри ВЧ та НЧ	2-полюсний фільтр високих частот та 3-полюсний фільтр низьких частот

Електричну принципову схему модуля AD8232 наведено на рис. 2.16.

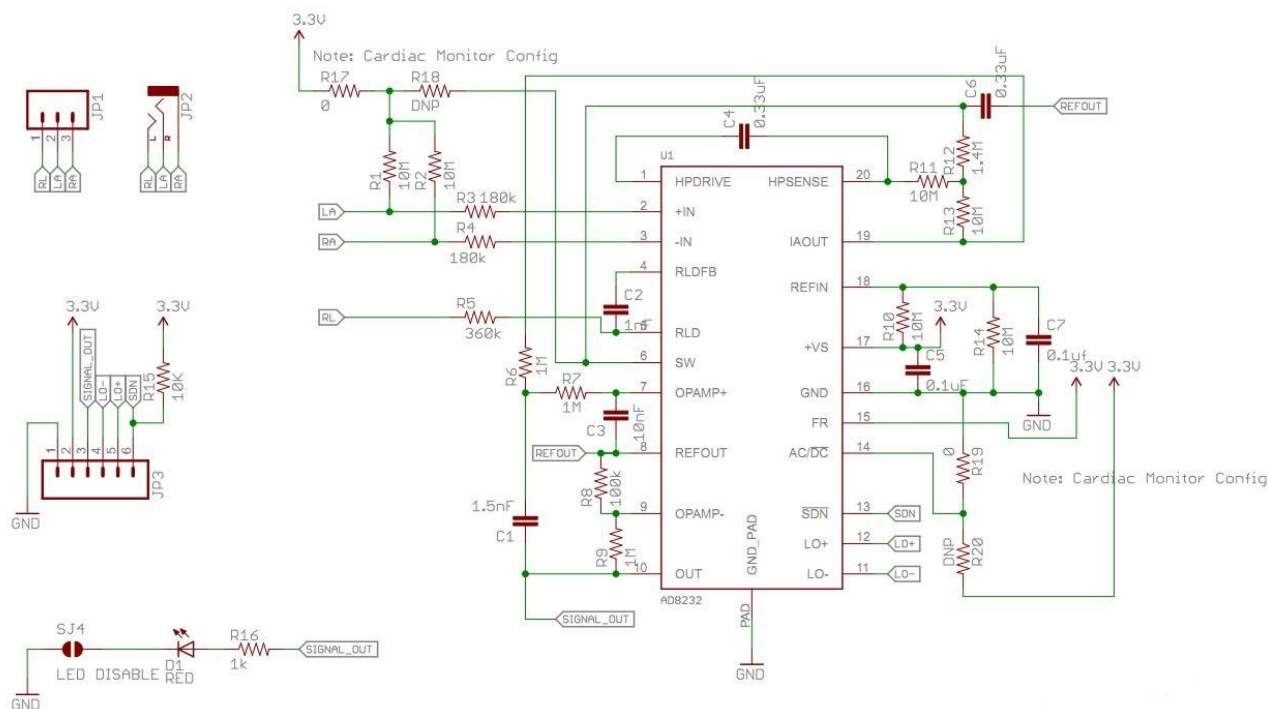


Рис. 2.16. Електрична схема модуля AD8232

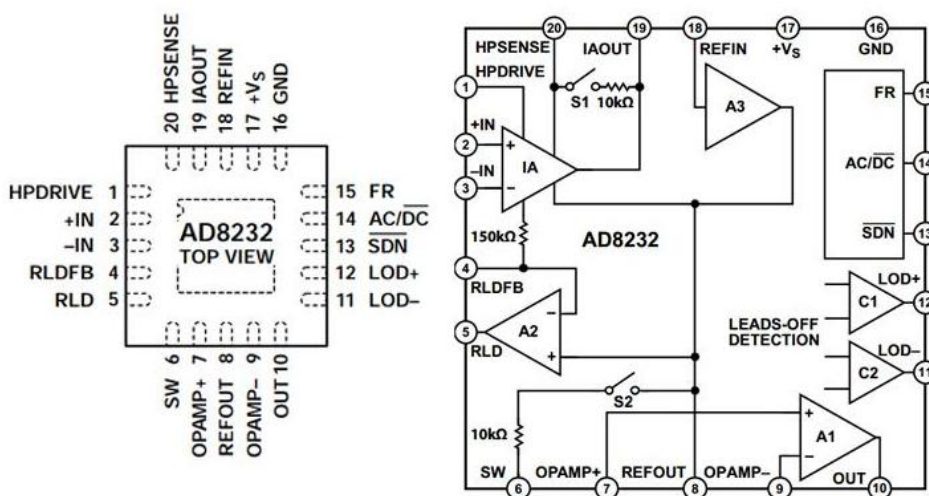


Рис. 2.17. Структурна схема та распиновка модуля AD8232

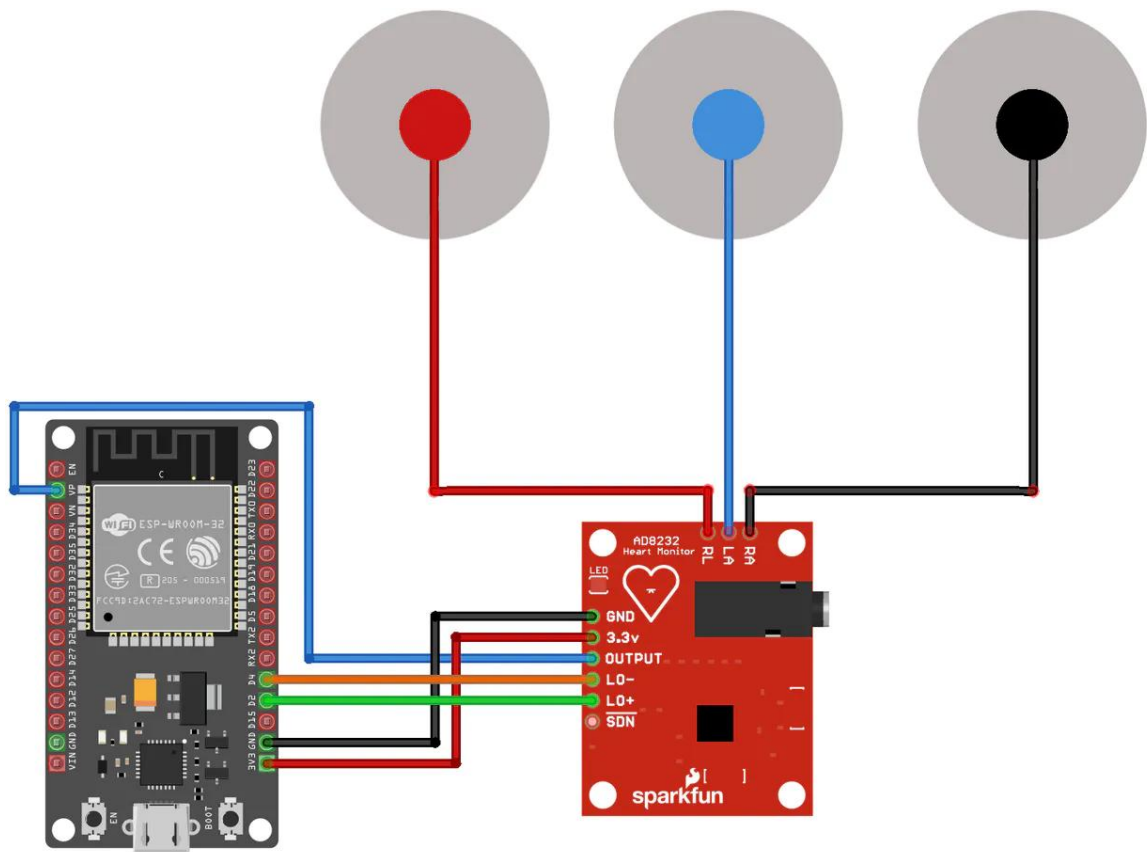


Рис. 2.20. Схема підключення модуля AD8232 до ESP32-WROOM-32

2.2.4. Опис давача для вимірювання температури тіла MAX30205

Давач MAX30205 призначений для контролю температури тіла та формує цифровий вихідний сигнал завдяки використанню високороздільного сигма-дельта аналого-цифрового перетворювача. Він забезпечує вимірювання температури в діапазоні від 0 до 50 °C.

Точність вимірювань становить $\pm 0,1$ °C у діапазоні температур від 37 °C до 39 °C. Завдяки високій чутливості давач MAX30205 може ефективно застосовуватися у складі медичного обладнання.

Давач MAX30205 відзначається низьким рівнем енергоспоживання, що є важливою перевагою під час застосування в портативних пристроях. На платі сенсора встановлено зумер, який формує звукове сповіщення у разі переривання процесу вимірювання. Зовнішній вигляд MAX30205 наведено на рисунку 2.21.

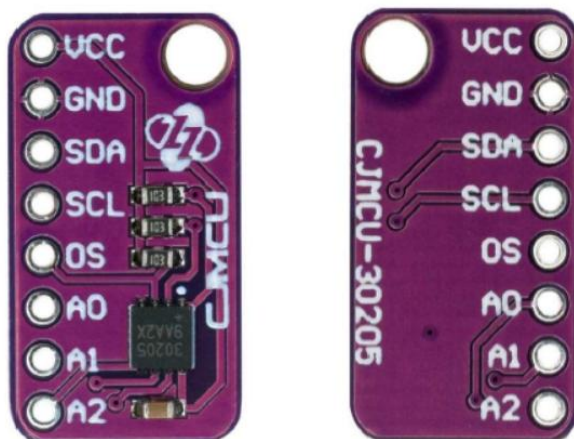


Рис. 2.21. Зовнішній вигляд давача MAX30205 температури тіла

Давач MAX30205 працює від напруги живлення в межах 2,7–3,3 В, при цьому споживаний струм не перевищує 600 мкА. Обмін даними з давачем здійснюється за допомогою інтерфейсу I²C. Технічні характеристики давача MAX30205 наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Характеристики давача температури тіла MAX30205

Характеристика	Значення
Тип	давач температури тіла
Тип кріплення	поверхневий монтаж
Діапазон вимірювання температури	0 - 50°C
Точність вимірювання	±0,1°C (в діапазоні від 37°C до 39°C)
Напруга живлення	2,7 - 3,3 В
Максимальний струм	600 мкА
Тип виходу	цифровий
Розрядність АЦП	16 біт
Інтерфейс	I ² C

Давач підтримує кілька режимів функціонування. Зокрема, MAX30205 може працювати в енергозберігаючому режимі з короткочасним вимкненням і подальшим ввімкненням для виконання одноразових вимірювань. Крім того, реалізовано функцію аварійного відключення пристрою у разі перегріву його компонентів. Схему під'єднання давача MAX30205 до шини I²C подано на рис. 2.22.

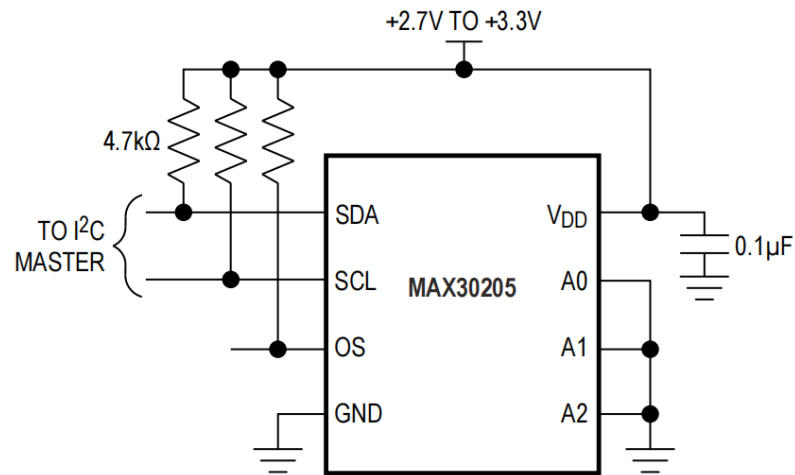


Рис. 2.22. Схема підключення датчика MAX30205 температури тіла до шини I²C



Рис. 2.23. Схема підключення датчика MAX30205 до ESP32-WROOM-32

2.2.5. Опис контролеру заряду акумулятора TP4056

Передбачається, що пристрій для контролю фізіологічних показників має бути портативним і працювати від автономного джерела живлення — акумуляторної батареї. У зв'язку з цим у схемі використано модуль TP4056, який здійснює керування процесами заряджання та розряджання акумулятора, запобігаючи виходу напруги за допустимі межі (рис. 2.24). Принцип його роботи значною мірою аналогічний системам керування заряджанням, що застосовуються у смартфонах та інших портативних пристроях.

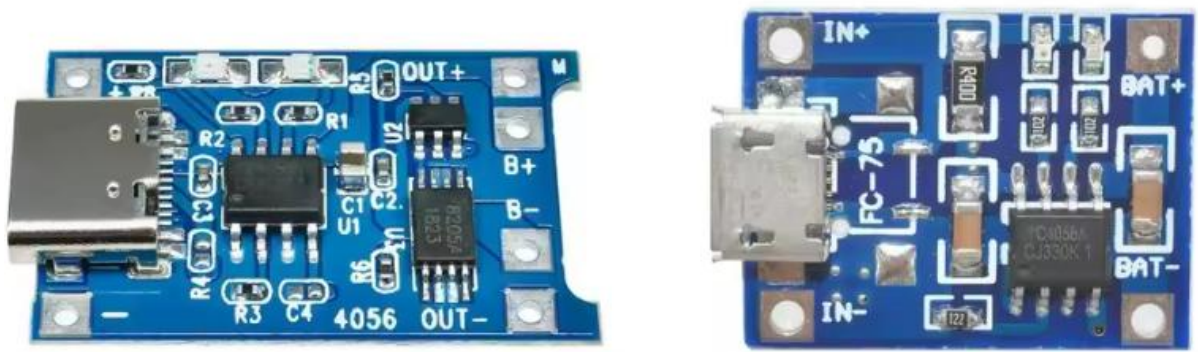


Рис. 2.24. Зовнішній вигляд TP4056

На платі модуля встановлено світлодіодні індикатори високої яскравості, які сигналізують про стан процесів заряджання та розряджання акумулятора. Живлення модуля може здійснюватися через роз'єм microUSB або через контактні виводи, розташовані поряд із ним. Електричну принципову схему модуля TP4056 наведено на рисунку 2.25.

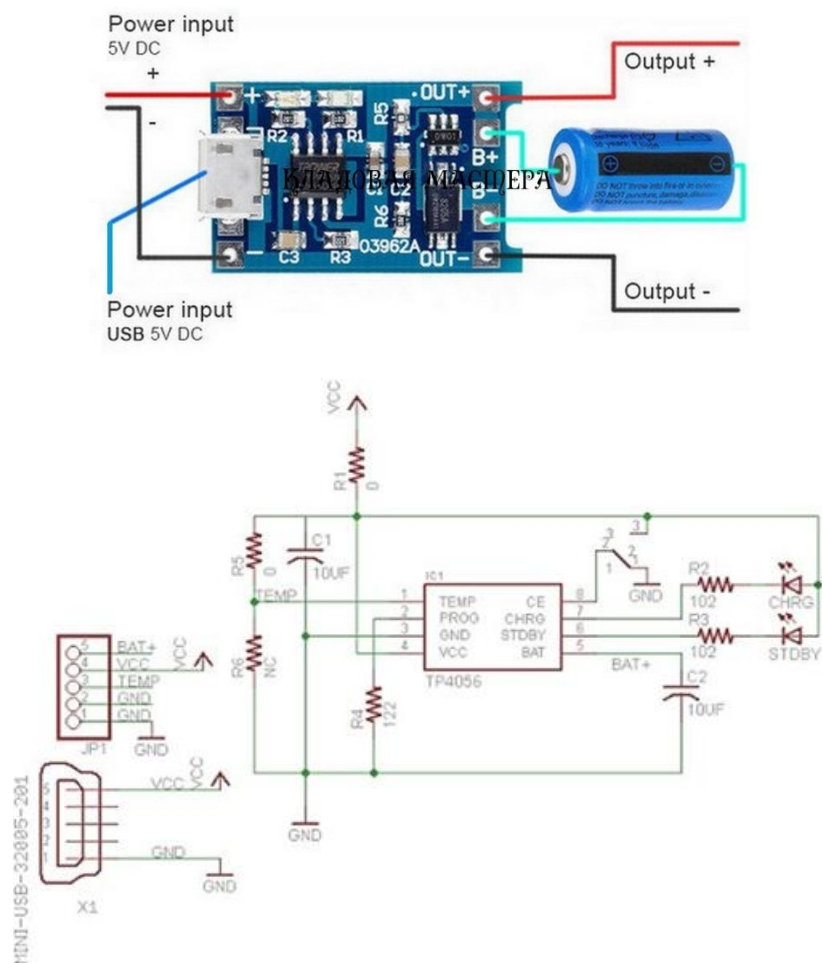


Рис. 2.25. Електрична схема контролера заряду акумуляторної батареї TP4056

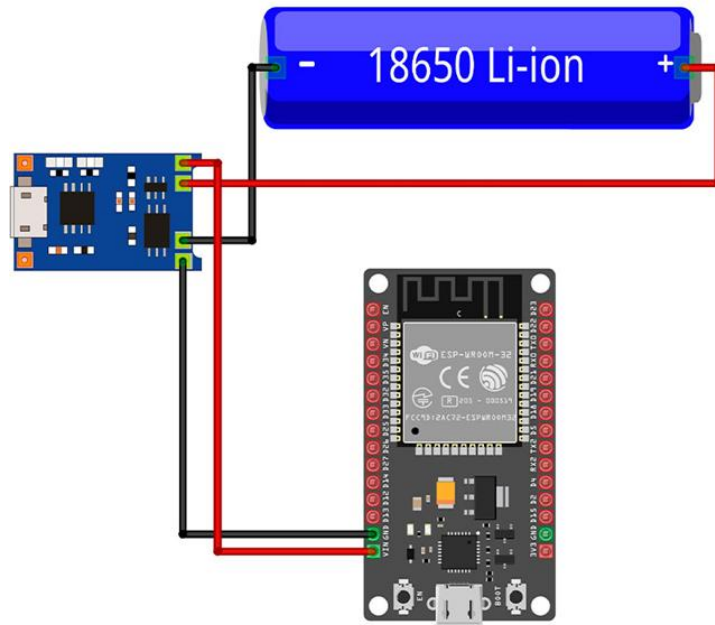


Рис. 2.26. Схема підключення TP4056 до ESP32-WROOM-32

2.2.6. Опис OLED-дисплея

OLED-дисплей виробництва Elecrow з інтерфейсом I2C є компактним і високоякісним засобом візуалізації, який може застосовуватися в різноманітних проєктах, зокрема в системах моніторингу стану людини (рис. 2.27).

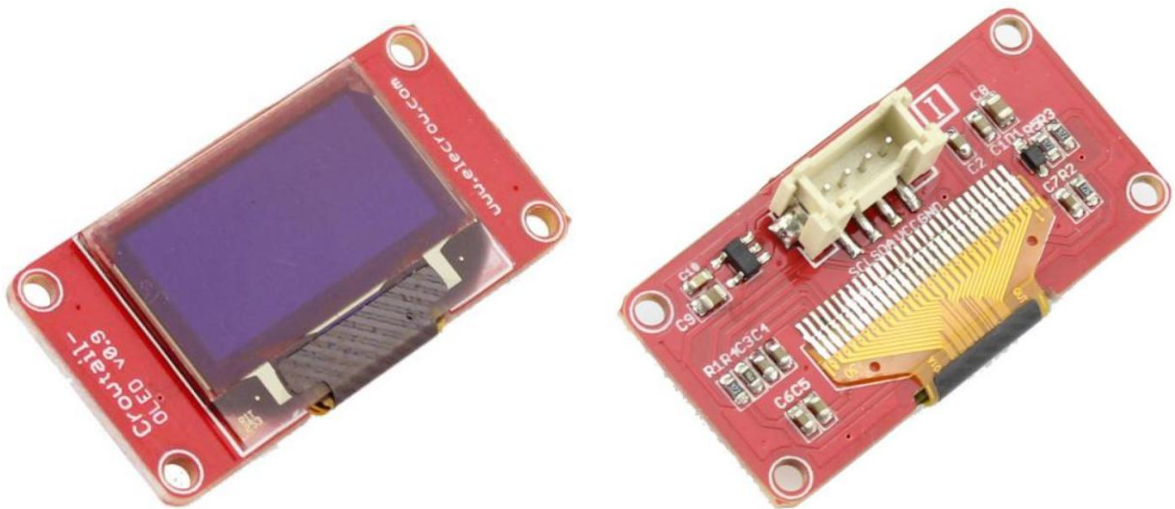


Рис. 2.27. Зовнішній вигляд графічного OLED дисплея

Дисплей має роздільну здатність 128×64 пікселі, що забезпечує достатній простір для відображення текстової інформації, графічних елементів та інших важливих даних. Висока чіткість зображення дає змогу коректно відтворювати деталізований вміст на екрані.

Пристрій працює на основі OLED-технології, яка забезпечує високу якість зображення, значний контраст і широкий кут огляду. Крім того, OLED-дисплеї

характеризуються швидким відгуком пікселів, що дозволяє відображати динамічну інформацію без ефекту розмиття.

OLED-дисплей оснащений вбудованим інтерфейсом I2C, завдяки якому він легко інтегрується з мікроконтролерами та іншими пристроями, що підтримують даний протокол. Використання I2C забезпечує передачу даних із мінімальною кількістю з'єднувальних провідників, що сприяє зменшенню складності апаратної реалізації системи.

Дисплей Elecrow характеризується високим рівнем контрастності та яскравості, що забезпечує чітке й добре помітне відображення інформації за умов недостатнього освітлення. Завдяки використанню OLED-технології, у порівнянні з іншими типами дисплеїв, він відзначається низьким енергоспоживанням, що є особливо важливим для портативних систем моніторингу, у яких критичною є тривалість автономної роботи.

OLED-дисплей від Elecrow має компактну та гнучку конструкцію, що спрощує його інтеграцію в різноманітні пристрої. Крім того, він підтримує відображення різних типів інформації, зокрема тексту, графіки, іконок та інших візуальних елементів, що підвищує зручність користування та наочність подання даних. Основні технічні характеристики OLED-дисплея наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Технічні характеристики OLED дисплея

Характеристика	Значення
Роздільна здатність	128x64
Напруга живлення	3,3 – 6 В
Діапазон робочих температур	-20 °C ~ +70 °C
Розмір дисплея	40x20 мм
Напруга живлення	2,7 - 3,3 В
Розмір видимої частини екрану	25x14 мм
Інтерфейс	I ² C

Попри численні переваги OLED-дисплея від Elecrow, доцільно враховувати й його певні обмеження. Зокрема, до недоліків можна віднести:

- можливість поступової втрати яскравості окремими пікселями, що може спричиняти нерівномірність підсвічування;
- підвищену чутливість до впливу вологості та високих температур, які здатні негативно позначатися на довговічності та надійності роботи;
- знижену читабельність інформації за умов прямого сонячного освітлення, що ускладнює використання дисплея на відкритому просторі.

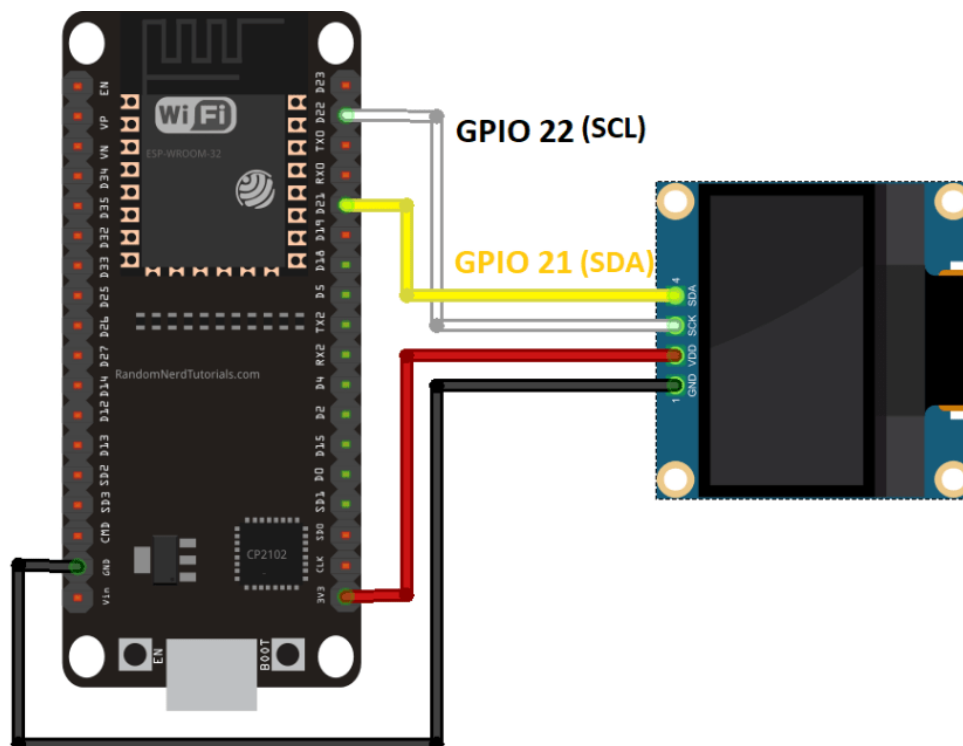


Рис. 2.26. Схема підключення OLED дисплея до ESP32-WROOM-32

У цілому OLED-дисплей є ефективним і зручним засобом візуалізації інформації в системах моніторингу показників серцевої діяльності людини. Він забезпечує високоякісне зображення з великим контрастом і достатньою роздільною здатністю, що дає змогу наочно та зрозуміло відображати ключові дані про серцеву активність.

Використання інтерфейсу I2C значно спрощує підключення дисплея до мікроконтролера та забезпечує надійний і зручний обмін даними між компонентами системи.

2.3. Опис схеми електричної принципової портативного пристрою для автоматизованої системи моніторингу стану людини на базі ESP32

Проектування електричної схеми здійснювалося з використанням програмного середовища EasyEDA (рис. 2.27), яке є сучасним інструментом для розробки апаратних рішень. Дане середовище поєднує широкий спектр функціональних можливостей, зокрема:

- редактор для створення та редагування електричних схем;
- інструменти для проектування й налаштування електронних компонентів;
- засоби розробки друкованих плат;
- веб-інтерфейс для онлайн-роботи з можливістю збереження проєктів у хмарному сховищі;
- систему керування проєктами, що забезпечує спільну роботу кількох користувачів над одним проєктом.

Важливою перевагою EasyEDA є безкоштовний доступ до платформи, а також наявність великої бібліотеки готових компонентів, що суттєво спрощує та пришвидшує процес проектування.

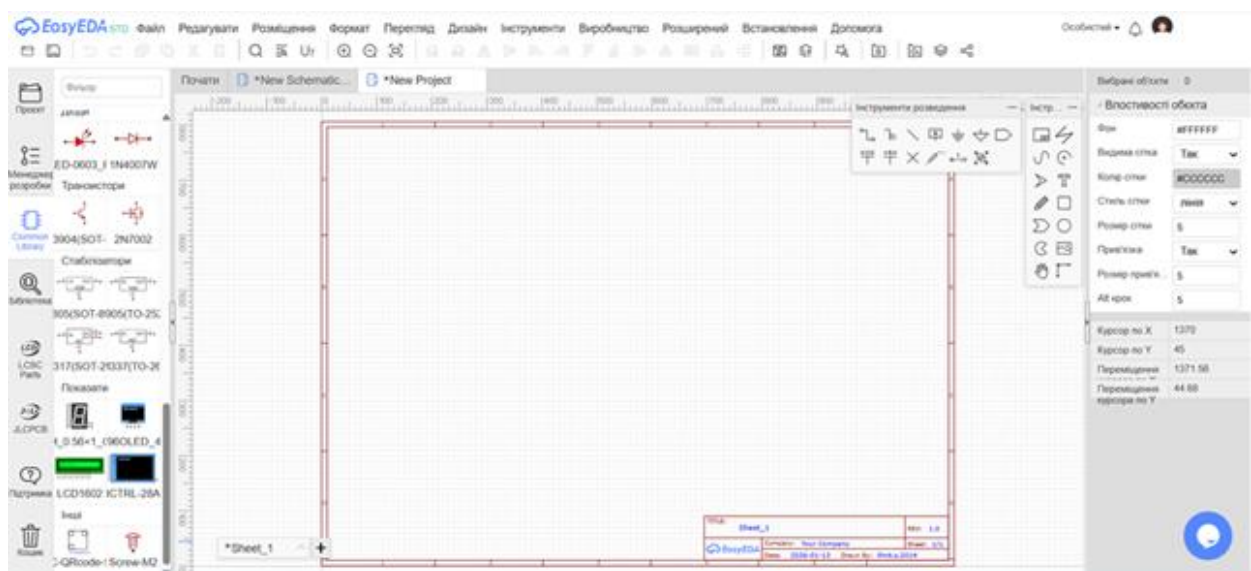


Рис. 2.27. Середовище EasyEDA для розробки електричної схеми з'єднань для проєктованої системи

На рисунку 2.28 представлено результат проектування електричної схеми з'єднань модуля системи моніторингу стану людини на базі ESP32.

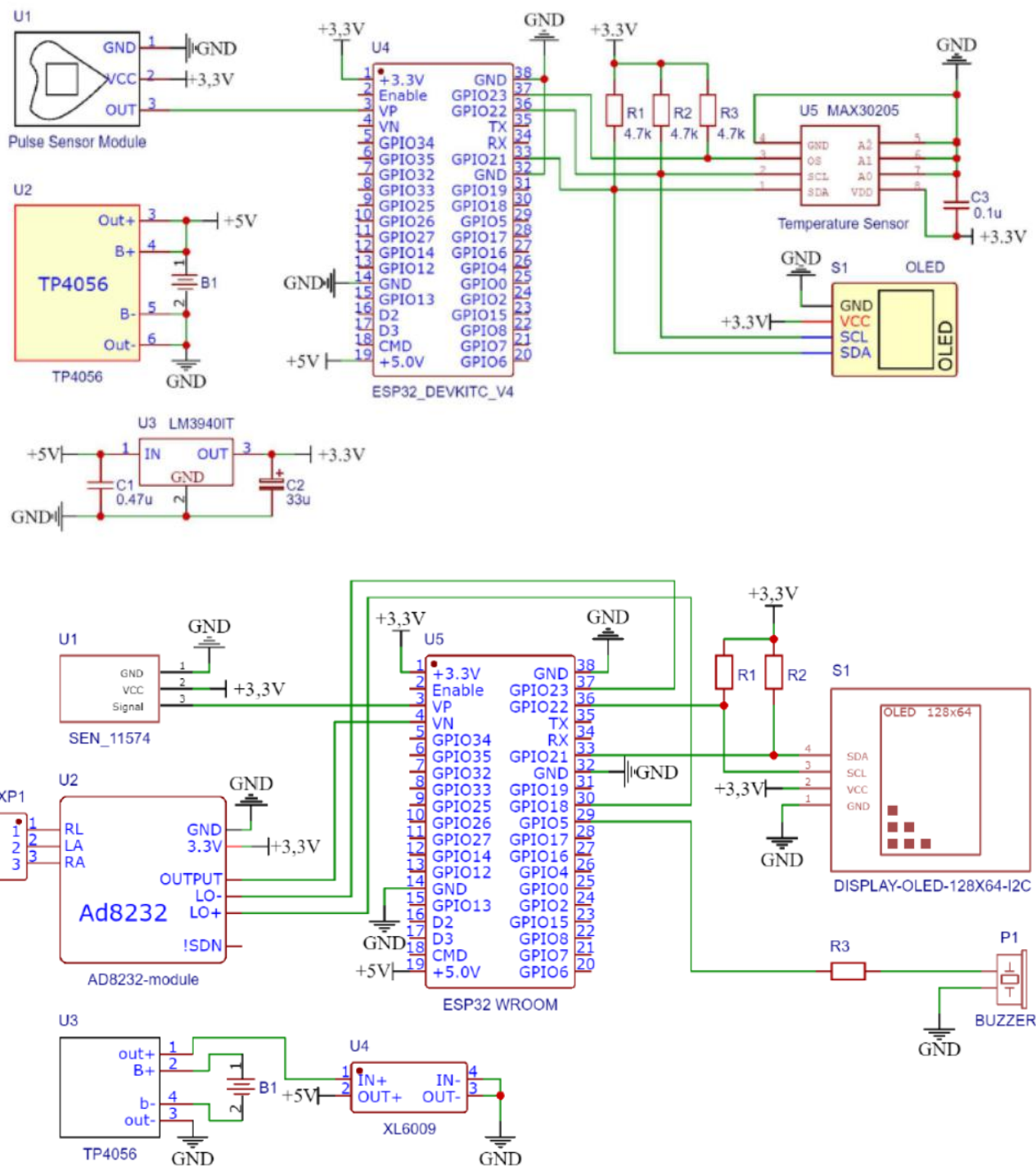


Рис. 2.28. Електрична принципова схема пристрою

Ключовим елементом схеми є модуль ESP32 WROOM DEVKIT, позначений як U4. Його живлення здійснюється від напруги +3,3 В, що формується стабілізатором LM3940IT (U3). На вхід стабілізатора подається напруга +5 В від акумуляторної батареї B1 через контролер заряду TP4056, який на схемі має позначення U2. Фільтрацію напруги в колі живлення забезпечують

керамічний конденсатор C1 ємністю 470 нФ та електролітичний конденсатор C2 номіналом 33 мФ.

Модуль давача серцевого ритму U1 також живиться від напруги +3,3 В і підключений до аналогового входу модуля U4. Давач температури тіла MAX30205, позначений на схемі як U5, передає інформацію в цифровому вигляді по шині I²C. До цієї ж шини під'єднано OLED-дисплей S1. Підтягування ліній шини I²C до напруги живлення +3,3 В забезпечують резистори R1, R2 і R3 з номіналом 4,7 кОм.

Платформа ESP32 WROOM містить мікроконтролер, призначений для обробки та керування даними, що надходять від давача серцевого ритму та модуля ЕКГ, а також оснащена вбудованими модулями бездротового зв'язку Wi-Fi і Bluetooth для передавання інформації на зовнішні пристрої.

OLED-дисплей S1 використовується для відображення отриманих показників, зокрема частоти серцевих скорочень та графіків ЕКГ, що дає змогу користувачу в режимі реального часу спостерігати за показниками роботи серця. Передавання даних на дисплей здійснюється від мікроконтролера платформи через інтерфейс I²C.

2.4. Висновки до розділу

У результаті виконання другого розділу було розроблено методи та апаратні засоби системи дистанційного моніторингу показників стану здоров'я людини. Синтезовано структурну схему пристрою для контролю стану здоров'я на базі платформи ESP32 WROOM із використанням давачів серцевого ритму, ЕКГ та температури тіла. Обґрунтовано вибір основних компонентів системи та наведено їх детальний опис. Також спроектовано електричну схему з'єднань розроблюваного пристрою.

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЛЮДИНИ НА БАЗІ ESP32

3.1. Розробка алгоритму роботи програми системи моніторингу стану людини

Для реалізації поставленої мети було створено алгоритмічне забезпечення проєктованої системи. На рис. 3.1 представлено блок-схему алгоритму роботи програми для моніторингу стану здоров'я користувача.

Алгоритм починається з ініціалізації I2C та UART інтерфейсів та підключення необхідних зовнішніх бібліотек:

- **Wire.h** – для підтримки роботи I2C інтерфейсу;
- **Protocentral_MAX30205.h** – для роботи з датчиком температури;
- **PulseSensorPlayground.h** – для взаємодії з датчиком пульсу;
- **WiFi.h** – для передачі даних через WiFi;
- **ThingSpeak.h** – для роботи з хмарним IoT-сервером.

Перед початком виконання головного циклу відбувається налаштування підключення до мережі через бездротове WiFi-з'єднання з використанням IP-протоколу.

У головному циклі програми здійснюється опитування стану датчика температури через I2C, а також вимірювання пульсу шляхом опитування ADC-каналу, до якого підключений датчик серцевого ритму. Отримані дані відображаються на OLED-дисплеї через I2C та надсилаються на послідовний порт для відображення в реальному часі.

Після цього перевіряється наявність підключення до Інтернету, і протягом визначеного часу дані передаються на веб-сервер за допомогою REST API.

Для забезпечення реалізації зазначених режимів було розроблено алгоритм функціонування портативної комп'ютеризованої системи моніторингу показників серцевої діяльності людини, який передбачає послідовне виконання низки етапів.

Ініціалізація системи. На етапі запуску здійснюється початкове налаштування та ініціалізація всіх апаратних компонентів системи, зокрема

активація датчика серцевого ритму, модуля реєстрації електрокардіограми, OLED-дисплея та звукового сигналізатора.

Зняття показників серцевої діяльності. Датчик серцевого ритму та модуль реєстрації електрокардіограми здійснюють фіксацію електричних сигналів, що генеруються під час роботи серця. Отримані сигнали проходять етап підсилення та надходять до мікроконтролера ESP32 WROOM, де виконуються подальші обчислювальні процедури.

Обробка сигналів. Мікроконтролер ESP32 WROOM виконує аналіз отриманих сигналів серцевої діяльності із застосуванням вбудованих алгоритмів цифрової обробки. У процесі обробки здійснюється визначення серцевого ритму, аналіз змін електрокардіограми, а також розрахунок ключових показників, зокрема частоти серцевих скорочень і параметрів варіабельності серцевого ритму.

Візуалізація даних. Результати обробки сигналів та інші релевантні параметри серцевої діяльності відображаються на OLED-дисплеї. Це забезпечує користувачеві можливість у режимі реального часу контролювати серцевий ритм і спостерігати динаміку змін електрокардіограми у графічному вигляді.

Формування звукових сповіщень. У випадку виникнення подій або станів, що потребують уваги користувача, звуковий генератор відтворює відповідні сигнали. Зокрема, звукове попередження активується при виявленні аномальних показників серцевого ритму або відхилень у сигналах ЕКГ.

Алгоритм функціонування системи також передбачає можливість бездротового передавання даних, зокрема за допомогою технології Bluetooth, на зовнішні пристрої для подальшого збереження, аналізу та візуалізації інформації. Для забезпечення автономної роботи система оснащена акумуляторним джерелом живлення, що дозволяє використовувати її без підключення до електричної мережі.

Крім того, в алгоритмі реалізовано енергозберігаючі механізми, зокрема автоматичне вимкнення дисплея за умов тривалої відсутності активності, що сприяє збільшенню тривалості автономної роботи пристрою.

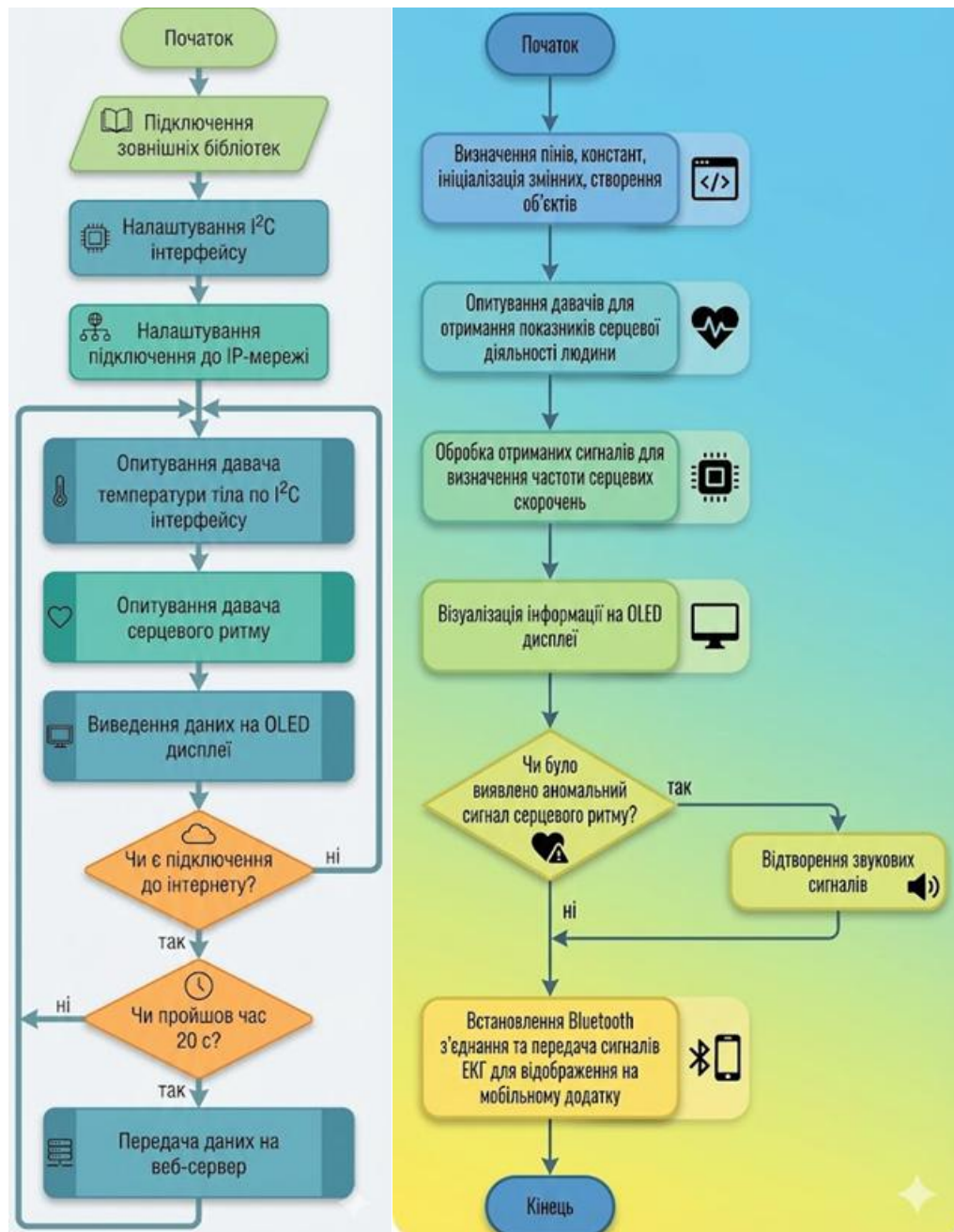


Рис. 3.1. Алгоритм роботи програми для системи дистанційного моніторингу стану здоров'я людини

3.2. Вибір засобів реалізації та середовища розробки програмного забезпечення

Для розробки програмного забезпечення мікроконтролера ESP32 у проєктованій системі обрана мова програмування Processing, яка базується на мовах C/C++. В якості середовища розробки використано Arduino IDE, робоча область якого показана на рис. 3.2.

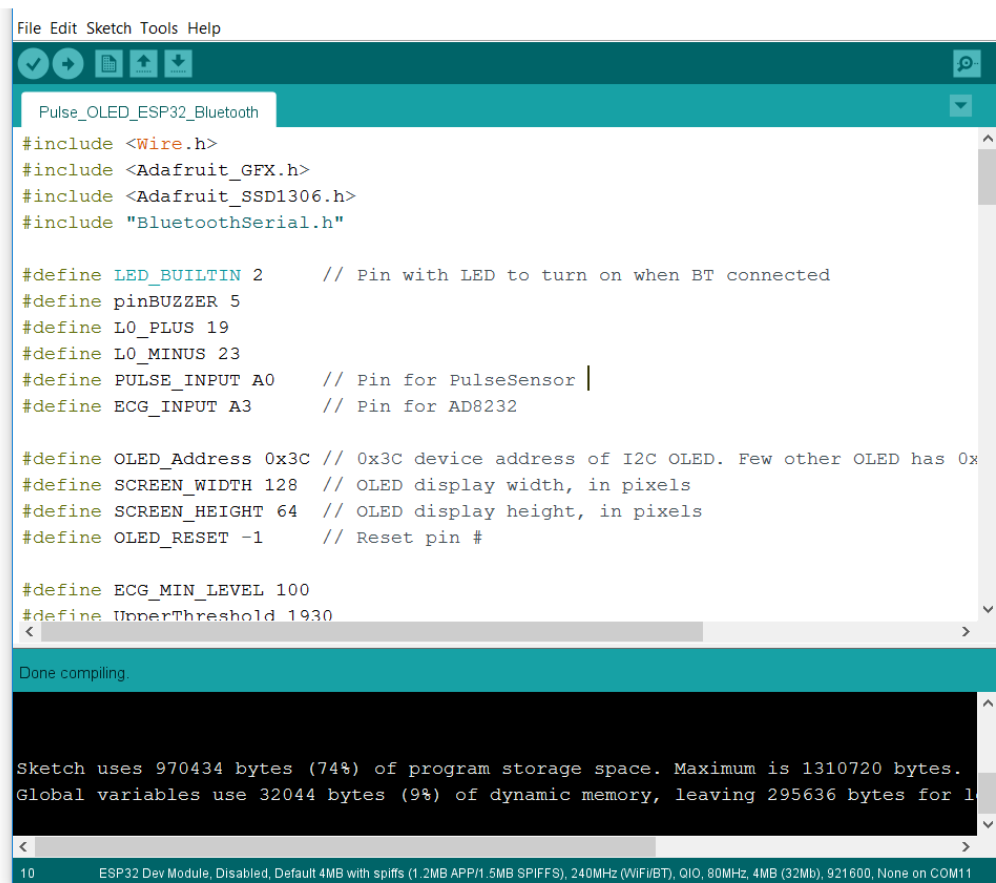


Рис. 3.2. Зовнішній вигляд робочої області Arduino IDE

Arduino IDE є універсальним крос-платформним середовищем для створення низькорівневого ПЗ для мікроконтролерів. Воно повністю безкоштовне та підтримує підключення великої кількості бібліотек, що значно спрощує процес розробки.

Вибір Arduino IDE для створення програмного забезпечення проєктованої системи обумовлений його численними перевагами:

- невеликі вимоги до об'єму пам'яті;
- мінімальне навантаження на ресурси комп'ютера;
- простота та зручність у користуванні;
- легке підключення до плати;
- повна сумісність з операційними системами Windows;
- підтримка кількох мов програмування;
- наявність широкого набору функцій та інструментів, необхідних для розробки.

Програма, написана в Arduino IDE, називається скетчем. Перед першою компіляцією скетч необхідно зберегти у окремому файлі на комп'ютері.

3.2.1. Налаштування середовища розробки для модуля ESP32

Щоб мати можливість розробляти програмний код для мікроконтролера **ESP32**, необхідно встановити відповідний модуль у середовищі **Arduino IDE**. Для цього слід відкрити вікно «**Preferences**» у меню «**File**» та вставити у відповідне поле посилання на файл формату **.JSON** (рис. 3.3).

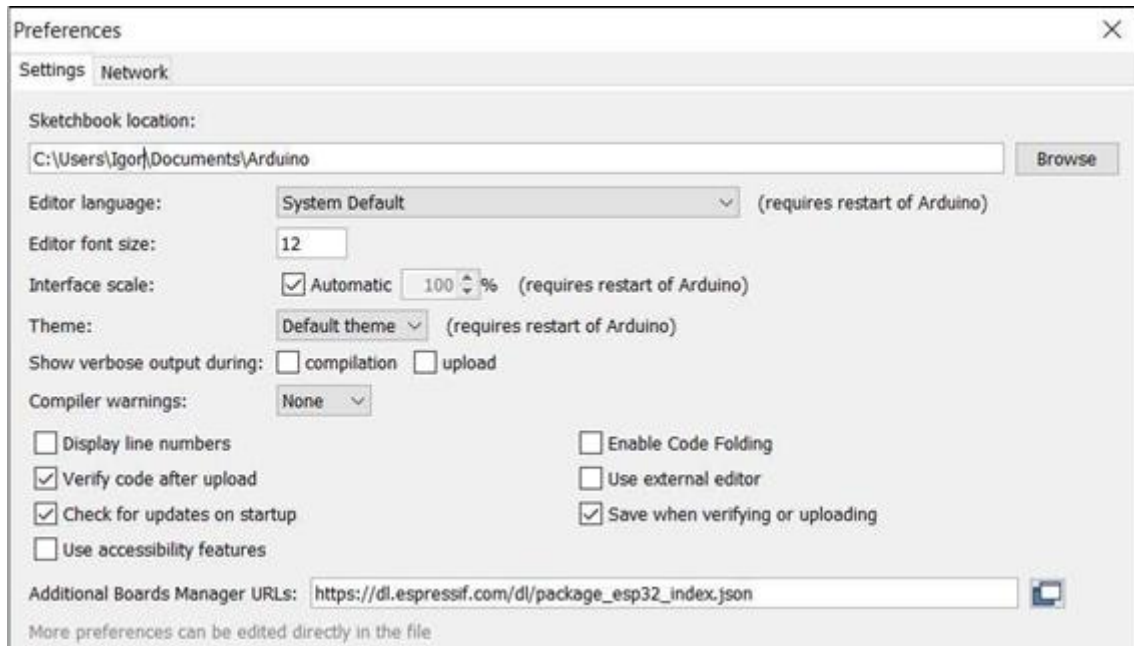


Рис. 3.3. Налаштування Arduino IDE для роботи з ESP32

Після цього слід відкрити «Boards Manager», який доступний у меню «Tools» → «Board», знайти модуль ESP32 та встановити його (рис. 3.4).

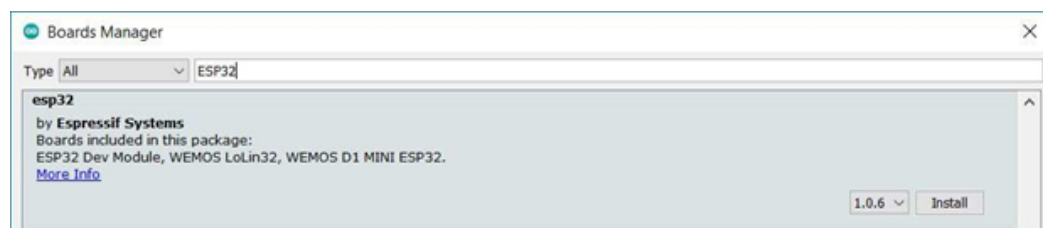


Рис. 3.4. Встановлення модуля ESP32 в Arduino IDE

Після успішного встановлення модуля у меню «Board» стане доступним вибір типу плати ESP32 Dev Module для роботи над проєктом (рис. 3.5).

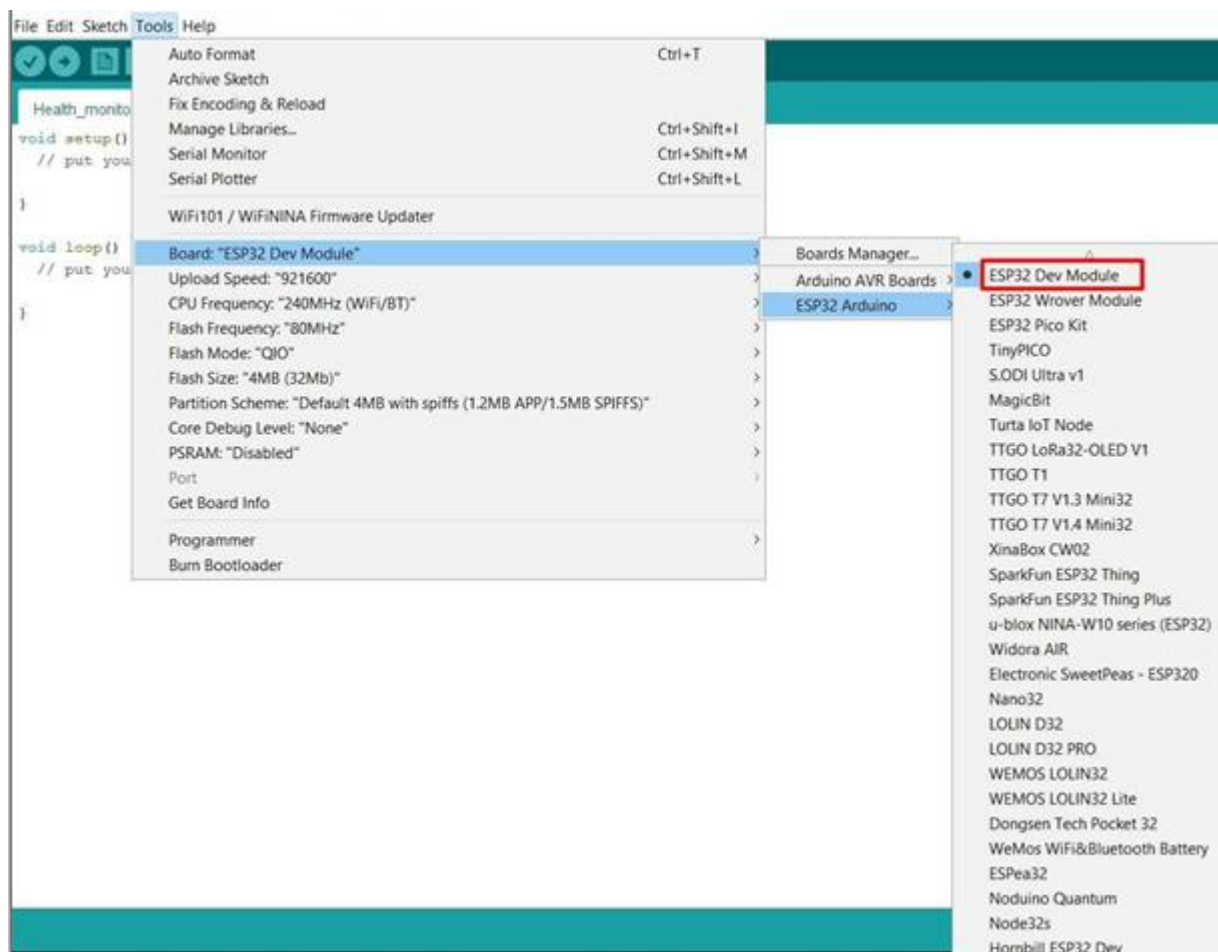


Рис. 3.5. Вибір плати ESP32 Dev Module в Arduino IDE

3.2.2. Встановлення зовнішніх бібліотек

Бібліотеки для Arduino – це набори файлів, які містять готовий програмний код у вигляді функцій, класів і структур даних. Їх можна підключати до проєкту після встановлення у середовищі Arduino IDE. Бібліотеки спрощують роботу з різними компонентами, такими як датчики, модулі, індикатори та інші пристрої, дозволяючи розробнику зосередитися на основній логіці програми без необхідності вручну писати код для другорядних операцій.

Більшість бібліотек доступні в Інтернеті, і їх можна безкоштовно завантажити та інтегрувати у свій проєкт. Кожна бібліотека організована у вигляді каталогу з файлами, які Arduino IDE автоматично підключає під час компіляції. IDE вставляє у код лише ті функції, класи та структури даних, що фактично використовуються в проєкті. Розробнику залишається лише додати відповідні команди у свій код, переконавшись, що потрібна бібліотека встановлена.

Перед використанням бібліотеки необхідно підключити її заголовочний файл з розширенням `.h` через директиву `#include` на початку коду. Існує кілька способів встановлення бібліотек: вручну або через інструменти Arduino IDE.

У межах цього проєкту було обрано другий спосіб. Для цього в меню Tools вибирають Manage Libraries, після чого відкривається Library Manager, де у полі пошуку вводиться назва потрібної бібліотеки. Саме так була встановлена бібліотека для роботи з датчиком серцевого ритму (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Встановлення зовнішньої бібліотеки PulseSensor у Arduino IDE

3.3. Розробка програмного забезпечення для проєктованої системи

3.3.1. Програмна реалізація опитування датчика серцевого ритму

Для роботи з датчиком серцевого ритму на початку програми була підключена бібліотека **PulseSensorPlayground.h**.

Було створено об'єкт **PulseSensorPlayground** з назвою **pulseSensor** для подальшого опитування та обробки сигналу датчика.

У функції **setup()** виконано початкове налаштування цього об'єкта (рис. 3.7).

```
Serial.begin(115200);  
// Configure the PulseSensor manager.  
pulseSensor.analogInput(PULSE_INPUT);  
pulseSensor.blinkOnPulse(PULSE_BLINK);  
pulseSensor.fadeOnPulse(PULSE_FADE);  
pulseSensor.setSerial(Serial);  
pulseSensor.setOutputType(OUTPUT_TYPE);  
pulseSensor.setThreshold(THRESHOLD);  
// Skip the first SAMPLES_PER_SERIAL_SAMPLE in the loop().  
samplesUntilReport = SAMPLES_PER_SERIAL_SAMPLE;  
// Now that everything is ready, start reading the PulseSensor  
if (pulseSensor.begin()) {  
    Serial.println("We created a pulseSensor Object!")  
}
```

Рис. 3.7. Лістинг коду для налаштування об'єкта pulseSensor

У головному циклі програми відбувається вимірювання значень пульсу. Паралельно отримані дані з аналогового входу передаються на послідовний порт для відображення та подальшого аналізу (рис. 3.8).

```
if (pulseSensor.sawNewSample()) {  
    if (--samplesUntilReport == (byte) 0) {  
        samplesUntilReport = SAMPLES_PER_SERIAL_SAMPLE;  
        pulseSensor.outputSample();  
        if (pulseSensor.sawStartOfBeat()) {  
            pulseSensor.outputBeat();  
        }  
    }  
}
```

Рис. 3.8. Лістинг коду для виведення даних об'єкта pulseSensor

Результати роботи датчика серцевого ритму можна переглянути на моніторі послідовного порту в середовищі Arduino IDE (рис. 3.9).

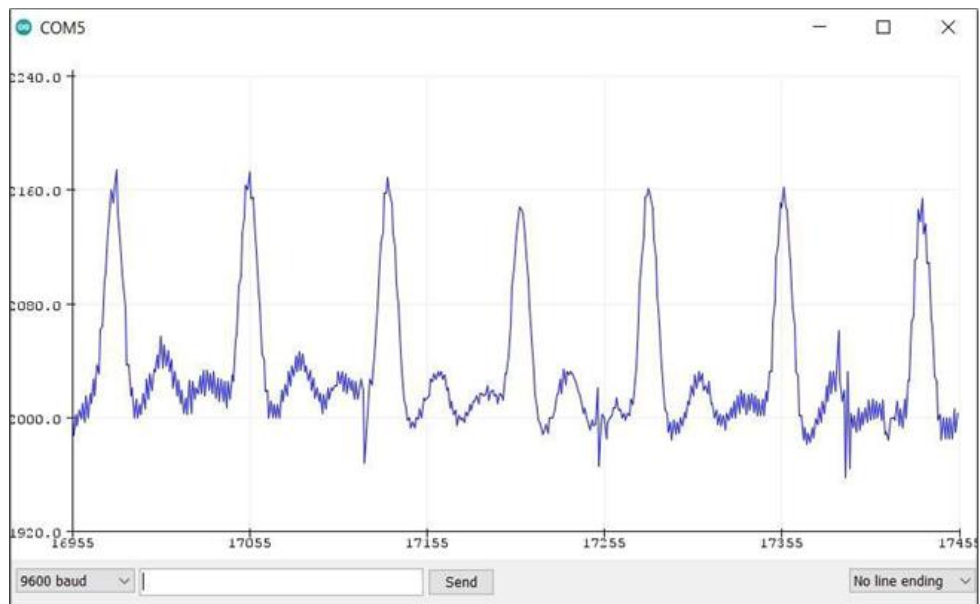


Рис. 3.9. Відображення сигналу від датчика серцевого ритму у вікні монітора послідовного порту

3.3.2. Програмна реалізація опитування датчика температури тіла

Для роботи з датчиком температури тіла MAX30205 була підключена відповідна бібліотека (рис. 3.10).

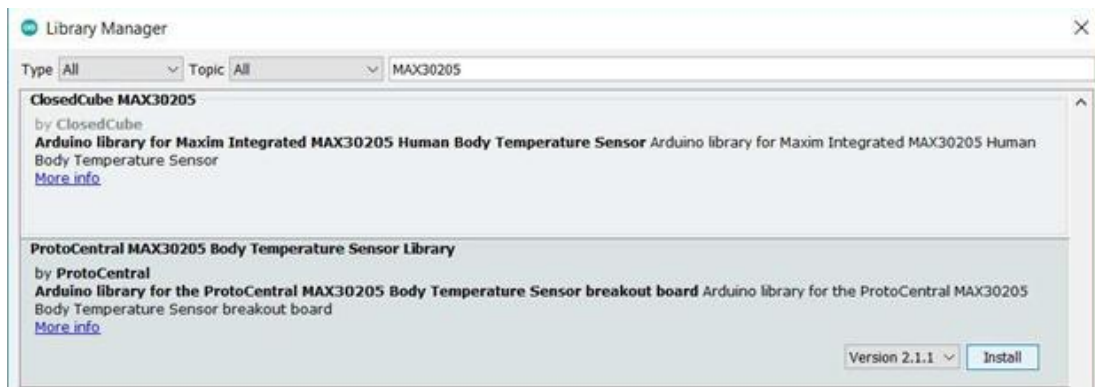


Рис. 3.10. Процес встановлення зовнішньої бібліотеки ProtoCentral MAX30205

Щоб здійснювати опитування датчика температури, необхідно спочатку підключити потрібні бібліотеки до проєкту.

```
#include <Wire.h>
```

```
#include "Protocentral_MAX30205.h"
```

У підпрограмі `setup()` виконується перевірка підключення датчика MAX30205 до шини I2C, що дозволяє переконатися в його доступності перед початком роботи (рис. 3.11).

```
Serial.begin(9600);
Wire.begin();
//Scan for temperature in every 30 sec untill a sensor is found.
while(!tempSensor.scanAvailableSensors()){
    Serial.println("Couldn't find the temperature sensor.");
    delay(30000);
}
```

Рис. 3.11. Лістинг коду для перевірки підключення датчика температури тіла

У головному циклі програми викликається функція, яка зчитує актуальне значення температури тіла для подальшого відображення та обробки.

```
float myTEMP = tempSensor.getTemperature(); // read temperature
```

3.3.3. Програмна реалізація відображення результатів моніторингу на OLED дисплеї

Для роботи з OLED дисплеєм у проєкті використано бібліотеку **Adafruit SSD1306** (рис. 3.12).

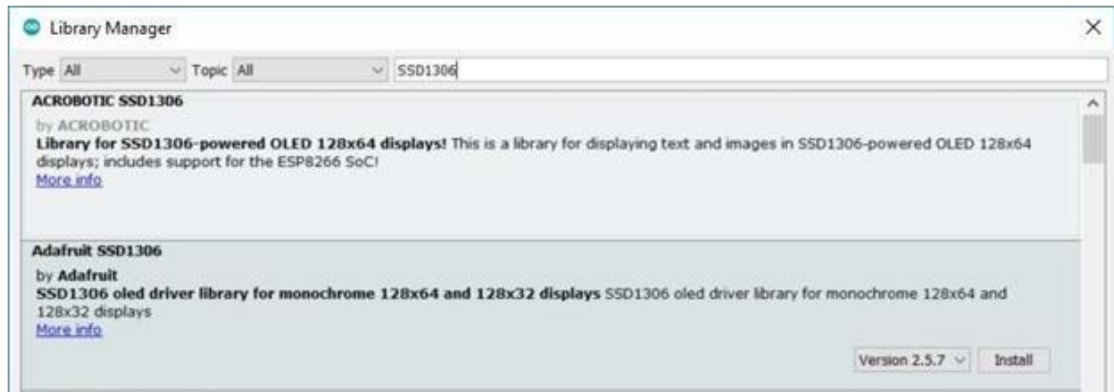


Рис. 3.12. Встановлення бібліотеки Adafruit SSD1306 для OLED дисплея
У програмі підключено бібліотеки:

- **Wire.h** – для роботи з I2C інтерфейсом;
- **Adafruit_SSD1306.h** – для керування OLED дисплеєм.

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <Adafruit_GFX.h>
```

```
#include <Adafruit_SSD1306.h>
```

Визначено параметри дисплея, зокрема його розмір (128×64 пікселів:

```
#define SCREEN_WIDTH 128 // OLED display width, in pixels
```

```
#define SCREEN_HEIGHT 64 // OLED display height, in pixels
```

Створено об'єкт для роботи з OLED дисплеєм:

```
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, -1);
```

У функції **setup()** здійснюється ініціалізація дисплея.

```
if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {  
    Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));  
    for(;;);  
}
```

На рисунку 3.13 наведено лістинг коду функції **loop()**, який відповідає за відображення результатів вимірювання серцевого ритму на OLED дисплеї.

Рисунок 3.14 демонструє приклад того, як виглядає відображення серцевого ритму на дисплеї.


```

if(x>127) {
    display.clearDisplay();
    x=0;
    lastx=x;
}
ThisTime = millis();
Signal = pulseSensor.getBeatsPerMunite();
display.setTextColor(SSD1306_BLACK, SSD1306_WHITE);
int y=60-(Signal/16); //4096 divide by 64
display.drawLine(lastx,lasty,x,y,SSD1306_WHITE);
lasty=y;
lastx=x;

if(Signal>UpperThreshold) {
    if(BeatComplete) {
        BPM=ThisTime-LastTime;
        BPM=int(60/(float(BPM)/1000));
        BPMTiming=false;
        BeatComplete=false;
    }
    if(BPMTiming==false) {
        LastTime=millis();
        BPMTiming=true;
    }
}
if((Signal<LowerThreshold) & (BPMTiming))
    BeatComplete=true;
display.setCursor(0,50);
display.print("BPM = ");
display.println(BPM);
display.display();
x++;

```

Рис. 3.13. Лістинг коду для виведення результатів серцевого ритму на OLED дисплей



Рис. 3.14. Відображення серцевого ритму на OLED дисплеї

3.3.4. Програмна реалізація опитування модуля ЕКГ AD8232

У цьому фрагменті коду (рис. 3.15) визначаються додаткові символічні константи та параметри, необхідні для роботи програми. Зокрема, тут задаються константи для ініціалізації OLED-дисплея та налаштування порогових значень аналогового сигналу ЕКГ. Використання символічних констант замість числових значень підвищує гнучкість програми та полегшує зміну параметрів без редагування основного коду.

```
#define OLED_Address 0x3C // 0x3C device address of I2C OLED
#define SCREEN_WIDTH 128 // OLED display width, in pixels
#define SCREEN_HEIGHT 64 // OLED display height, in pixels
#define OLED_RESET -1 // Reset pin #

#define ECG_MIN_LEVEL 100
#define UpperThreshold 1930
#define LowerThreshold 1910
```

Рис. 3.15. Лістинг констант для ініціалізації OLED-дисплея та обробки сигналів датчиків

На рисунку 3.16 наведено фрагмент коду процедури `setup()`, у якій відбувається початкове налаштування мікроконтролера ESP32 перед початком виконання основного циклу програми.

```
// initialize the serial communication:
Serial.begin(9600);
Serial.println(); // blank line in serial ...
// initialize digital pins as outputs
pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
pinMode(pinBUZZER, OUTPUT);
// initialize digital pins as inputs
pinMode(LO_PLUS, INPUT); // Setup for leads off detection LO+
pinMode(LO_MINUS, INPUT); // Setup for leads off detection LO-
// initialize the serial BT communication:
ESP_BT.register_callback(callback);
if(!ESP_BT.begin("ESP32_ECG")){
    Serial.println("An error occurred initializing Bluetooth");
}else{
    Serial.println("Bluetooth Device is Ready to Pair...");
}
oled.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, OLED_Address);
```

Рис. 3.16. Фрагмент коду процедури `setup()`

У процедурі `setup()` виконуються такі дії:

- ініціалізація послідовного зв'язку зі швидкістю 9600 бод;
- налаштування цифрових виводів мікроконтролера;

- реєстрація зворотного виклику для Bluetooth-з'єднання;
- перевірка коректності ініціалізації Bluetooth та виведення відповідного повідомлення;
- ініціалізація OLED-дисплея з використанням адреси 0x3C;
- очищення дисплея та встановлення розміру шрифту, кольору тексту й позиції курсора;
- виведення статичного тексту на дисплей.

Цей код виконується лише один раз під час запуску мікроконтролера ESP32 і забезпечує підготовку всіх необхідних параметрів для подальшої роботи системи.

Фрагмент коду на рисунку 3.17 містить основну логіку обробки сигналу ЕКГ та взаємодії з Bluetooth-модулем. Цей блок коду відповідає за зчитування сигналу ЕКГ, його передавання через Bluetooth та виявлення ситуацій, коли сигнал опускається нижче встановленого порогового рівня.

Спочатку перевіряється стан пінів LO_MINUS і LO_PLUS. Якщо хоча б один із цих пінів має значення 1, це може свідчити про втрату контакту електродів зі шкірою пацієнта. Якщо обидва піни рівні 0, виконується подальший блок коду.

Далі здійснюється зчитування сигналу ЕКГ з аналогового входу за допомогою функції `analogRead(ECG_INPUT)` та збереження його у змінну `ECG_signal`. Якщо змінна, що відповідає за стан Bluetooth-з'єднання (`BT_cnx`), має значення `true`, сигнал ЕКГ передається на зовнішній пристрій через функцію `ESP_BT.println(ECG_signal)`. У випадку, якщо значення сигналу нижче порогового рівня (`ECG_MIN_LEVEL`), активується звуковий сигнал тривоги.

```

if((digitalRead(L0_MINUS) == 1) || (digitalRead(L0_PLUS) == 1)){
    Serial.println('!');
    ESP_BT.println('!');
}
else{
    // send the value of analog input 3 to serial:
    int ECG_signal = analogRead(ECG_INPUT);
    Serial.println(ECG_signal);
    //Do the same for bluetooth
    if(BT_cnx){
        ESP_BT.print('E'); //make the app Bluetooth Graphics
        ESP_BT.println(ECG_signal);
    }
    if (ECG_signal < ECG_MIN_LEVEL) {
        digitalWrite(pinBUZZER, HIGH); // Trigger the buzzer
        delay(1000); // Keep the buzzer on for 1
        digitalWrite(pinBUZZER, LOW); // Turn off the buzzer
    }
}
}

```

Рис. 3.17. Фрагмент коду для обробки сигналу ЕКГ

Процедура зворотного виклику callback використовується для контролю встановлення та розриву Bluetooth-з'єднання (рис. 3.18). Вона дозволяє відслідковувати стан Bluetooth і виконувати відповідні дії при підключенні або відключенні клієнта. У коді перевіряється тип події (event), після чого виконуються необхідні дії. Основні оброблювані події:

- **ESP_SPP_SRV_OPEN_EVT** – подія виникає при підключенні клієнта до Bluetooth-сервера. У цьому випадку виводиться повідомлення "Client Connected", вмикається світлодіод, підключений до піна **LED_BUILTIN**, а змінна **BT_cnx** встановлюється в true, що означає активне Bluetooth-з'єднання;
- **ESP_SPP_CLOSE_EVT** – подія виникає при розриві з'єднання клієнтом. Виконується виведення повідомлення "Client disconnected", вимикається світлодіод **LED_BUILTIN**, змінна **BT_cnx** приймає значення false, після чого мікроконтролер ESP32 перезавантажується за допомогою методу **ESP.restart()**.

```

void callback(esp_spp_cb_event_t event, esp_spp_cb_param_t *param) {
    if(event == ESP_SPP_SRV_OPEN_EVT){
        Serial.println("Client Connected");
        digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
        BT_cnx = true;
    }
    if(event == ESP_SPP_CLOSE_EVT ){
        Serial.println("Client disconnected");
        digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
        BT_cnx = false;
        ESP.restart();
    }
}
}

```

Рис. 3.18. Лістинг процедури callback

3.4. Реалізація віддаленого моніторингу показників здоров'я з використанням IoT-платформи

3.4.1. Обґрунтування вибору IoT-платформи

Для відображення результатів моніторингу серцевого ритму та температури тіла було обрано популярну хмарну IoT-платформу ThingSpeak. Вона дозволяє зберігати, аналізувати та обробляти дані за допомогою вбудованих функцій Matlab. Принцип роботи платформи ThingSpeak показаний на рис. 3.19. Крім того, вибір цієї платформи обумовлений її безкоштовним використанням для некомерційних проєктів.

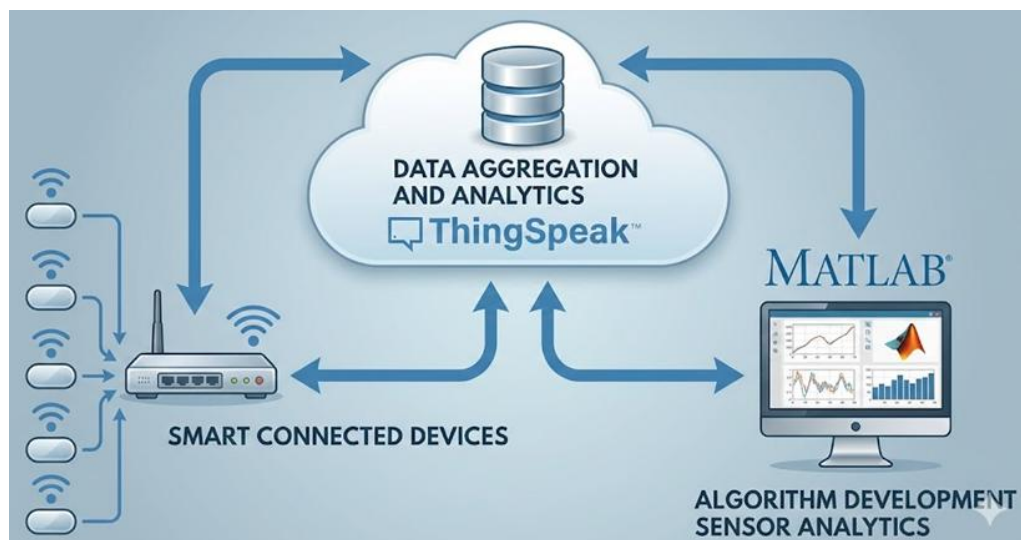


Рис. 3.19. Принцип роботи платформи ThingSpeak

Потокові дані в ThingSpeak надходять у режимі реального часу через канали, використовуючи протоколи MQTT або REST API. У безкоштовному

акаунті можна створити до чотирьох каналів, кожен із яких може містити до восьми інформаційних полів. Канали можуть бути загальнодоступними або приватними.

3.4.2. Створення та налаштування каналу в ThingSpeak

Для реалізації даного проєкту було створено канал «Health Monitoring System» з інформаційними полями «Pulse Rate» та «Body Temperature» (рис. 3.20).

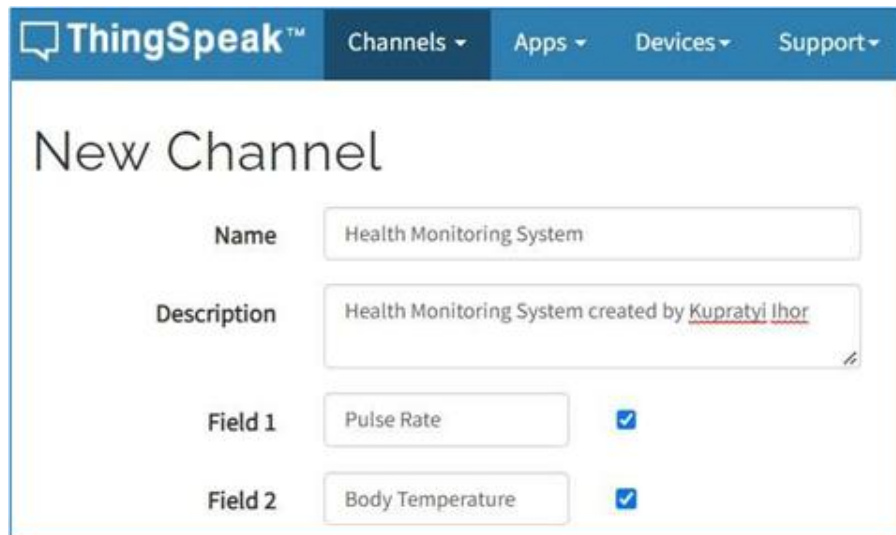
The image shows the 'New Channel' form in the ThingSpeak web interface. The form has a blue header with the ThingSpeak logo and navigation links: Channels, Apps, Devices, and Support. The main content area is titled 'New Channel'. It contains four input fields: 'Name' with the value 'Health Monitoring System', 'Description' with the value 'Health Monitoring System created by Kupratyi Ihor', 'Field 1' with the value 'Pulse Rate' and a checked checkbox, and 'Field 2' with the value 'Body Temperature' and a checked checkbox.

Рис. 3.20. Створення каналу в ThingSpeak для проєктованої системи

Для передачі даних необхідно отримати **API-ключ каналу ThingSpeak** (рис. 3.21).

The image shows the 'API Keys' page in the ThingSpeak web interface for the 'Health Monitoring System' channel. The page has a blue header with the ThingSpeak logo and navigation links: Channels, Apps, Devices, and Support. The main content area is titled 'Health Monitoring System'. It displays the channel ID '1985020', the author 'mwa0000018132791', and the access level 'Private'. Below this, there are tabs for 'Private View', 'Public View', 'Channel Settings', 'Sharing', 'API Keys' (which is highlighted with a red circle), and 'Data Import / Export'. The 'API Keys' section is titled 'Write API Key' and shows a 'Key' field with the value 'EQRK5VI8' followed by a redacted area. A red rectangle highlights the 'Key' label and the input field. Below the field is a button labeled 'Generate New Write API Key'. On the right side, there is a 'Help' section with text about API keys and a link to 'API Keys Se'.

Рис. 3.21. Отримання API-ключа каналу в ThingSpeak

3.4.3. Програмна реалізація передачі даних в ThingSpeak

Для програмної організації передачі даних з модуля **ESP32** доцільно використати зовнішню бібліотеку **ThingSpeak** (рис. 3.22).



Рис. 3.22. Встановлення бібліотеки для роботи з платформою ThingSpeak

Спочатку слід відключити апаратні переривання Arduino IDE у верхній частині коду, оскільки ESP32 не підтримує апаратні переривання з використанням датчиків і бібліотеки Arduino. На початку програми необхідно вказати параметри підключення до **WiFi** та дані каналу ThingSpeak: його **ID** і **API-ключ** для запису даних (рис. 3.23).

```
#define USE_ARDUINO_INTERRUPTS false
#include <Wire.h>
#include "Protocentral_MAX30205.h"
#include <PulseSensorPlayground.h>
#include <WiFi.h>
#include <ThingSpeak.h>

MAX30205 tempSensor;
const char ssid[] = "WiFi_SSID";
const char password[] = "xxxxxxxxxx";
WiFiClient client;
const long CHANNEL = 1985020;
const char *WRITE_API = "EQRK5VI8xxxxxxxxxx";

long prevMillisThingSpeak = 0;
int intervalThingSpeak = 20000; // write interval is 20 seconds
```

Рис. 3.23. Лістинг коду для налаштування з'єднання з каналом ThingSpeak по WiFi

Лістинг коду для надсилення результатів вимірювань датчика серцевого ритму показаний на рис. 3.24. Значення пульсу отримується за допомогою функції **getBeatsPerMinute()**, а температура тіла – за допомогою функції **getTemperature()**. Для обмеження некоректних даних використовується оператор **if**, який фільтрує пульс у діапазоні 40–150 та температуру тіла – 35–

41°C. Це дозволяє запобігти надсиланню випадкових чи неточних значень у ThingSpeak.

```
int myBPM = pulseSensor.getBeatsPerMunite();// read pulse rate
float myTEMP = tempSensor.getTemperature(); // read temperature

if (millis() - prevMillisThingSpeak > intervalThingSpeak) {
  // Set the fields with the values
  if (myBPM>40 && myBPM<150) {
    ThingSpeak.setField(1, myBPM);
  }
  if (myTEMP>35 && myTEMP<41) {
    ThingSpeak.setField(2, myTEMP);
  }
  // Write to the ThingSpeak channel
  int x = ThingSpeak.writeFields(CHANNEL, WRITE_API);
  if (x == 200) {
    Serial.println("Channel update successful.");
  }
  else {
    Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code " +
      String(x));
  }
  prevMillisThingSpeak = millis();
}
```

Рис. 3.24. Лістинг коду для надсилання даних датчиків у ThingSpeak

3.4.4. Відображення результатів моніторингу в ThingSpeak

Результати моніторингу параметрів стану здоров'я в IoT-платформі ThingSpeak наведені на рисунках 3.25 та 3.26.

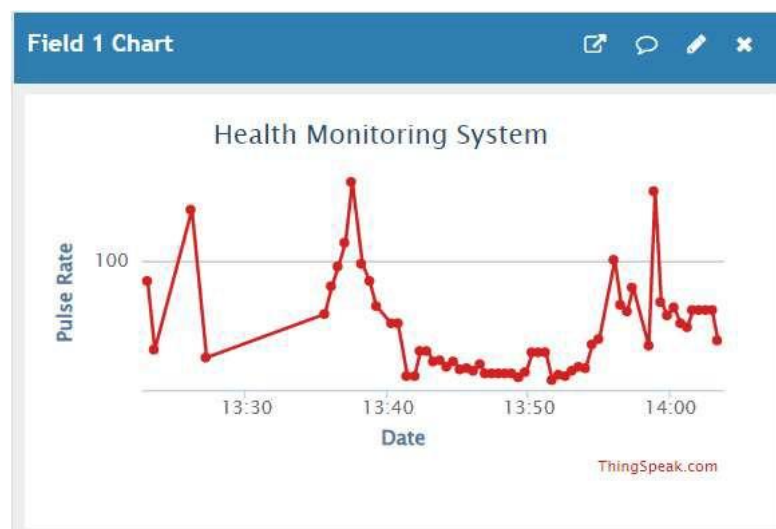


Рис. 3.25. Відображення результатів моніторингу серцевого ритму людини в ThingSpeak



Рис. 3.26. Відображення результатів моніторингу температури тіла людини в ThingSpeak

3.5. Налаштування мобільного додатку Bluetooth Graphics

Мобільний додаток Bluetooth Graphics є ефективним інструментом для взаємодії зі зовнішніми пристроями через Bluetooth на смартфонах з ОС Android. Він дозволяє встановлювати з'єднання з розробленим пристроєм для моніторингу показників серцевої діяльності та отримувати дані ЕКГ у реальному часі. Основні можливості додатку включають відображення сигналів у вигляді графіків, візуалізацію електрокардіограм та збереження даних для подальшого аналізу. Завдяки цим функціям користувач може зручно відстежувати зміни в ЕКГ та оцінювати стан серцевої діяльності безпосередньо на смартфоні.

Підключення до пристрою здійснюється через Bluetooth із використанням відповідного протоколу обміну даними. Після встановлення з'єднання додаток отримує та відображає ЕКГ сигнал у реальному часі, що дає змогу користувачеві оперативно контролювати показники серцевої діяльності. Крім того, Bluetooth Graphics надає можливість налаштування параметрів збору даних, таких як швидкість зчитування сигналу, масштабування графіків та фільтрація сигналу, що дозволяє адаптувати додаток до індивідуальних потреб користувача та оптимізувати процес візуалізації та аналізу ЕКГ.

Таким чином, мобільний додаток Bluetooth Graphics є зручним і функціональним інструментом для отримання, відображення та аналізу ЕКГ

сигналу на смартфоні через Bluetooth, використовуючи розроблений пристрій. Процес налаштування Bluetooth-з'єднання з ESP32 наведено на рис. 3.27.

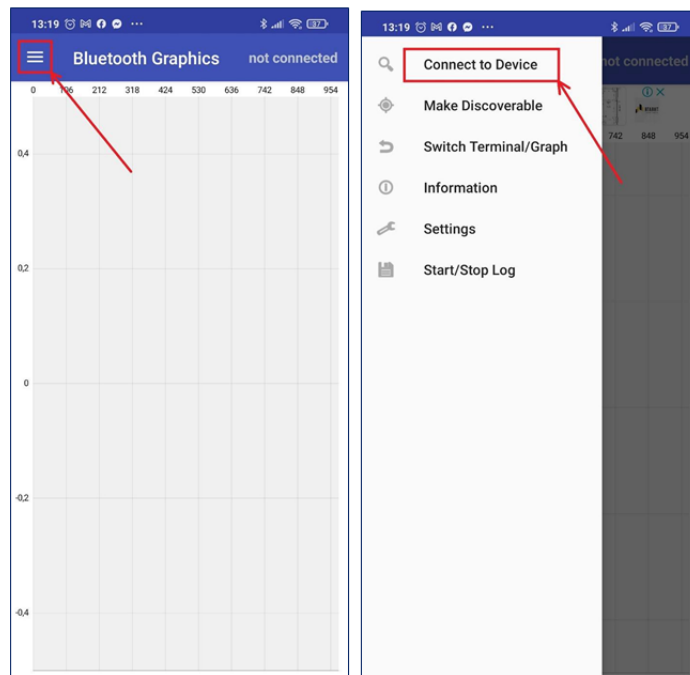


Рис. 3.27. Налаштування мобільного додатку Bluetooth Graphics

Додаток автоматично здійснить пошук доступних Bluetooth-пристроїв. Необхідно знайти та вибрати пристрій з ідентифікатором ESP32_ECG зі списку доступних пристроїв. Процес сканування мережі та підключення до пристрою ESP32_ECG показаний на рис. 3.28.

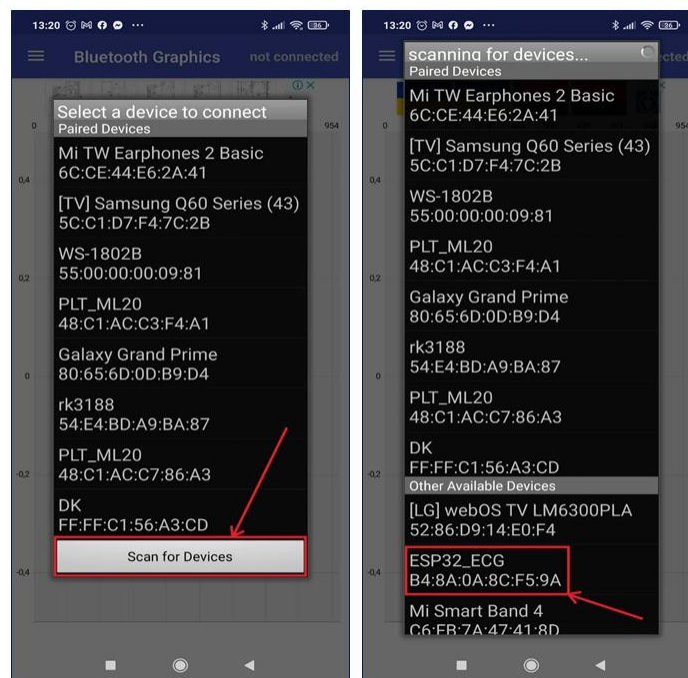


Рис. 3.28. Пошук і підключення до проєктованого пристрою у додатку Bluetooth Graphics

У разі успішного встановлення з'єднання додаток відобразить повідомлення про підключення на екрані смартфона. Крім того, на платі ESP32 загориться вбудований синій світлодіод, що сигналізує про активне Bluetooth-з'єднання.

3.6. Тестування системи моніторингу показників серцевої діяльності людини

Прототип системи було створено для збору та відображення даних про серцеву діяльність людини з метою моніторингу її стану (рис. 3.29).

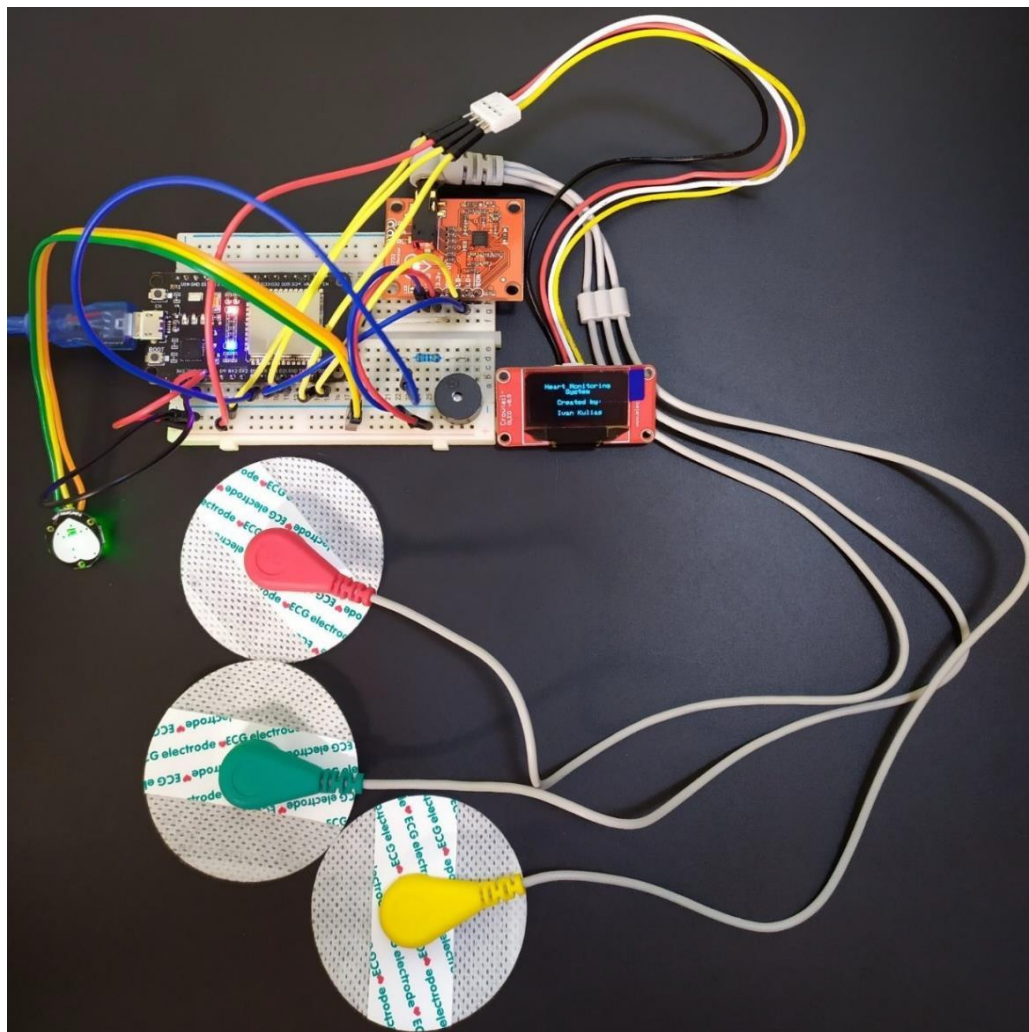


Рис. 3.29. Прототип системи моніторингу ПСД людини

Прототип складається з датчика серцевого ритму, модуля для зняття ЕКГ, платформи ESP32 WROOM, OLED-дисплея, генератора звуку, автономного джерела живлення та смартфона. Його було протестовано для перевірки працездатності та точності вимірювань. Під час тестування збиралися дані серцевої активності, включаючи частоту серцевого ритму та сигнал ЕКГ. Ці дані

передавалися на платформу ESP32, де оброблялися та відображалися на OLED-дисплеї й на смартфоні, що забезпечувало зручне спостереження.

Результати тестування показали, що прототип системи функціонує належним чином. Він забезпечує точне визначення частоти серцевих скорочень з відображенням на OLED-дисплеї та виведенням сигналу ЕКГ на мобільному пристрої. Додатково генератор звуку спрацьовує для оповіщення у разі виявлення аномальних показників або надмірної частоти серцевих скорочень. Наявність автономного джерела живлення дозволяє тривалу роботу без підключення до електромережі.

Датчик серцевого ритму під час тестування був прикріплений до вказівного пальця. Результати вимірювання ЧСС відображаються на OLED-дисплеї пристрою (рис. 3.30).



Рис. 3.30. Результат вимірювання ЧСС

Під час проведення тестів електроди модуля AD8232 були підключені до тіла користувача відповідно до схеми, наведеної на рис. 3.31.

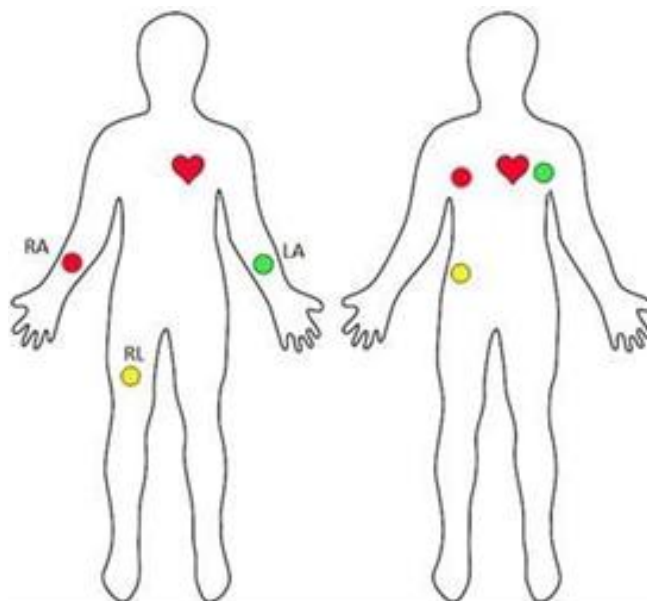


Рис. 3.31. Підключення електродів до тіла людини

Результати вимірювання ЕКГ за допомогою модуля AD8232, які відображаються у вікні «Serial Plotter» середовища Arduino IDE, представлені на рис. 3.32.

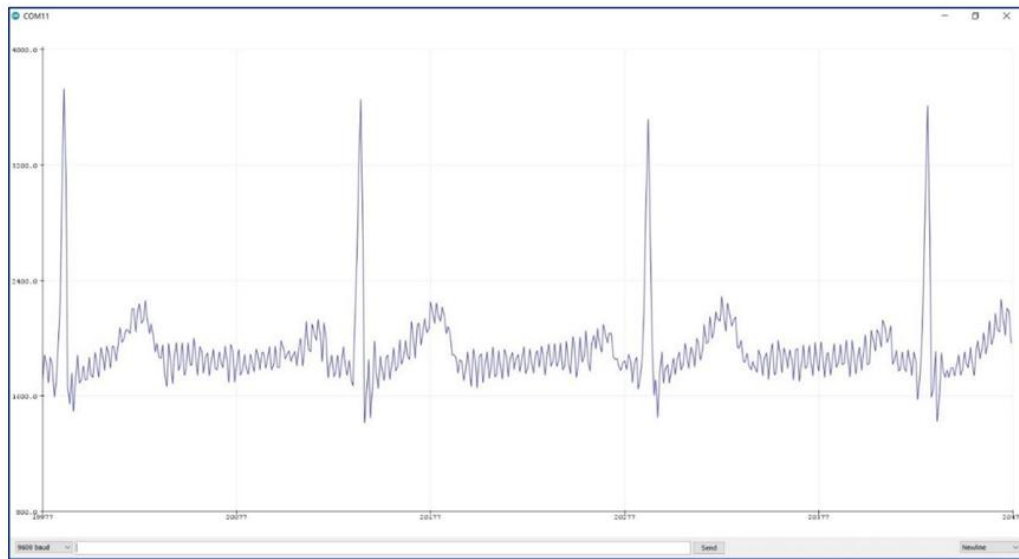


Рис. 3.32. Результат вимірювання ЕКГ на ПК у вікні «Serial Plotter»

Цей графік забезпечує наочний та зручний спосіб візуалізації ЕКГ сигналу безпосередньо в середовищі Arduino IDE. Значення сигналу відображаються у вигляді ліній, що з'єднують точки, відповідні вимірам у різні моменти часу. Користувач може налаштовувати масштаб по обох осях для оптимального перегляду даних. Завдяки цьому інструменту можна спостерігати зміни ЕКГ сигналу в реальному часі та аналізувати його характеристики, зокрема регулярність серцевого ритму, наявність аритмій або інших відхилень у роботі серцево-судинної системи.

Мобільний додаток Bluetooth Graphics дозволяє відображати ЕКГ сигнал на смартфоні у вигляді графіка, приклад якого наведено на рис. 3.33. На осі абсцис відображений час, а на осі ординат – амплітуда сигналу. Користувач може змінювати колір та товщину ліній графіка для більш зручного перегляду. На графіку видно основні характеристики ЕКГ, а також можливі артефакти сигналу. Збережені результати дають змогу користувачам та медичним працівникам аналізувати серцевий ритм і виявляти потенційні аномалії або відхилення у функціонуванні серцево-судинної системи.

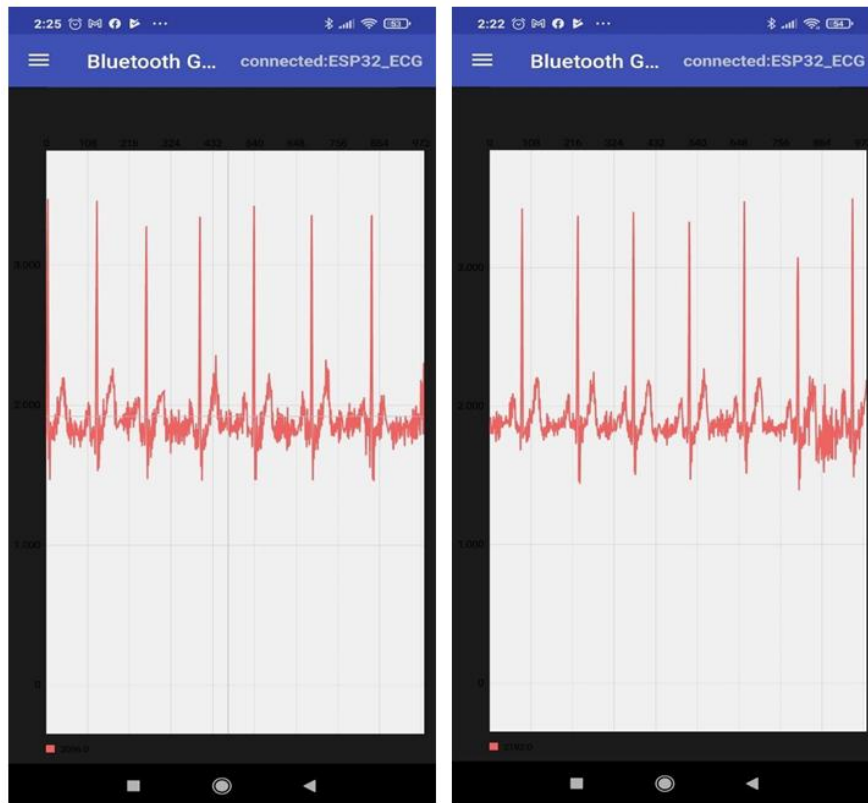


Рис. 3.33. Відображення ЕКГ у додатку Bluetooth Graphics

Результати тестування підтверджують, що розроблений прототип системи моніторингу показників серцевої діяльності є ефективним інструментом для збору та аналізу даних про серцеву активність. Система може використовуватися для своєчасного виявлення аномалій та моніторингу стану серцево-судинної системи, що сприяє покращенню діагностики та догляду за здоров'ям користувачів.

Висновки до розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи представлені результати розробки програмного забезпечення для системи віддаленого моніторингу стану здоров'я людини. Було створено блок-схему алгоритму роботи програми, обрано засоби реалізації проєкту та середовище розробки програмного забезпечення. Описано налаштування середовища для модуля ESP32 та встановлення необхідних зовнішніх бібліотек.

Розроблено програмне забезпечення для проєктованої системи, зокрема код для зчитування даних з датчиків серцевого ритму, ЕКГ та температури тіла. Забезпечено відображення отриманих значень на OLED-дисплеї.

Також реалізовано віддалений моніторинг параметрів здоров'я за допомогою IoT-платформи ThingSpeak. Детально описано процес створення та налаштування каналу на цій хмарній платформі, а також програмну передачу даних з ESP32 для відображення результатів моніторингу серцевого ритму та температури тіла.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, що полягає у розробці та дослідженні автоматизованої системи дистанційного моніторингу стану людини на базі мікроконтролерної платформи ESP32 із використанням технологій Інтернету медичних речей. У процесі виконання роботи отримано такі основні результати.

1. Проведено огляд та ґрунтовний аналіз сучасних підходів, технологій і систем дистанційного моніторингу стану здоров'я людини в рамках концепції ІоМТ. Виявлено основні переваги та недоліки існуючих комерційних і дослідницьких рішень, що дало змогу обґрунтувати доцільність створення доступної, відкритої та гнучкої автоматизованої системи моніторингу. Це підтвердило доцільність розробки доступного портативного пристрою з можливістю гнучкої інтеграції у хмарні сервіси.
2. Досліджено предметну область дистанційного моніторингу фізіологічних параметрів людини та визначено ключові показники, які є найбільш інформативними для оцінки стану здоров'я, зокрема частоту серцевих скорочень, рівень сатурації крові киснем, електрокардіограму та температуру тіла.
3. Обґрунтовано вибір апаратної платформи ESP32 як базового елемента системи, що забезпечує необхідну обчислювальну потужність, низьке енергоспоживання та наявність вбудованих модулів бездротового зв'язку Wi-Fi і Bluetooth. Також обґрунтовано вибір біомедичних сенсорів MAX30102 (пульс та сатурація), AD8232 (зняття ЕКГ) та MAX30205 (температура тіла) для вимірювання відповідних фізіологічних параметрів.
4. Розроблено структурну та електричну принципову схеми портативного пристрою автоматизованої системи моніторингу стану людини, яка включає підсистеми живлення (на базі контролера заряду TP4056), вимірювання та відображення інформації. Забезпечено автономність пристрою та коректне узгодження рівнів сигналів між сенсорами та

мікроконтролером, що гарантує стабільну роботу в портативному режимі та можливість подальшої модернізації системи.

5. Розроблено алгоритми роботи системи та програмний код у середовищі Arduino IDE для мікроконтролера ESP32, який забезпечує ініціалізацію сенсорів, зчитування "сирих" даних, їх цифрову фільтрацію та перетворення у фізичні величини. Реалізовано локальний інтерфейс користувача з виведенням результатів вимірювань (ЧСС, SpO₂, температури, графіку ЕКГ) на OLED-дисплей у реальному часі.
6. Реалізовано передачу вимірюваних даних до хмарної IoT-платформи ThingSpeak за допомогою бездротового з'єднання Wi-Fi, а також налаштовано взаємодію з мобільним додатком Bluetooth Graphics через інтерфейс Bluetooth, що забезпечує гнучкий доступ до результатів моніторингу з різних пристроїв.
7. Проведено експериментальне тестування розробленої системи, яке підтвердило її працездатність, стабільність функціонування та достатню точність вимірювання основних фізіологічних показників. Отримані результати засвідчили можливість використання розробленого прототипу для персонального моніторингу стану здоров'я в домашніх умовах.

Таким чином, поставлена мета магістерської роботи досягнута, а всі визначені завдання – виконані. Розроблена автоматизована система моніторингу стану людини є функціонально завершеним апаратно-програмним комплексом, який може бути використаний як основа для створення персональних медичних пристроїв, систем для віддаленого нагляду за літніми людьми, пацієнтами з хронічними захворюваннями або для самоконтролю спортсменів, а також у навчальному процесі при вивченні біомедичної електроніки та IoT-технологій.

Запропоноване рішення відрізняється від аналогів низькою собівартістю та використанням відкритих протоколів передачі даних.

Подальший розвиток роботи може бути спрямований на розширення набору вимірюваних параметрів, підвищення точності обробки сигналів,

застосування методів інтелектуального аналізу даних та інтеграцію з професійними медичними інформаційними системами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Купратий І. Г., Паламар А. М. Комп'ютерна система для дистанційного моніторингу стану здоров'я пацієнтів. *Актуальні задачі сучасних технологій : збірник тез доповідей XI міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів*. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 142.
2. Марценюк В. П., Качур І. В., Сверстюк А. С. та ін. Моніторинг стану здоров'я за функціональними показниками за допомогою сенсорів у реабілітаційній медицині: систематичний огляд. *Вісник наукових досліджень*. 2019. № 2. С. 5–12.
3. Гоженко А., Кульбіда М., Кочет О. Профілактична стратегія медичної науки – шлях до підвищення ефективності охорони здоров'я. *Вісник НАН України*. 2011. № 12. С. 64–69.
4. Харковлюк-Балакіна Н. В., Горго Ю. П., Медвидчук К. В. Імплементація моніторингових технологій контролю стану здоров'я пацієнтів для населення територіальних громад. *Біомедична інженерія і технологія*. 2020. № 4. С. 107–116.
5. Мінцер О. П., Банчук М. В., Ярменчук І. А., Дяченко С. О. Основні вимоги до структури типових медичних інформаційних систем в управлінні охороною здоров'я. *Медична інформатика та інженерія*. 2011. № 2. С. 34–35.
6. Злепко С. М., Белзецький Р. С. Система дистанційного моніторингу за станом здоров'я людини. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2008. С. 217–219.
7. Паламар А. М., Купратий І. Г. Система для дистанційного моніторингу стану здоров'я пацієнтів на основі інтернету медичних речей. *Матеріали X науково-технічної конференції ТНТУ «Інформаційні моделі, системи та технології»*. Тернопіль : ТНТУ, 2022. С. 85.
8. Goerning M., Kvetkat A., Brehm B. et al. Feasibility and Effectiveness of Home Care Telemedicine in Patient with Heart Failure in Thuringia. *World Congress*

- on Medical Physics and Biomedical Engineering*. Munich, Germany, 2009. P. 79–81.
9. Vishnu S., Ramson S. J., Jegan R. Internet of Medical Things (IoMT) - An overview. *5th international conference on devices, circuits and systems*. 2020. P. 101–104.
 10. Сміянов В. А., Дрига Н. О. Перспективи впровадження сучасних інформаційно-комунікаційних систем на рівні первинної медико-санітарної допомоги. *Україна. Здоров'я нації*. 2019. № 1 (54). С. 159–165.
 11. Палагнюк Д. М., Барась С. Т. Система дистанційного моніторингу. *Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. Вінниця, 2018. С. 87–89.
 12. Lee Y. G., Jeong W. S., Yoon G. Smartphone-based mobile health monitoring. *Telemedicine and e-Health*. 2012. Vol. 18, no. 8. P. 585–590.
 13. Melnyk A., Morozov Y., Havano B., Hupalo P. Intellectual tools to prevent road accidents by monitoring the driver's physiological state. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. P. 539–546.
 14. Sorwar G., Hasan R. Smart-TV based integrated e-health monitoring system with agent technology. *2012 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. 2012. P. 406–411.
 15. Ghassemi F., Hoseinzadeh M. S., Ekhlasi A. Design and Implementation of Wireless Body Temperature Monitor with warning system via SMS. *2020 6th Iranian Conference on Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS)*. 2020. P. 1–5.
 16. Agarwal S., Lau C. T. Remote health monitoring using mobile phones and Web services. *Telemedicine and e-Health*. 2010. Vol. 16, no. 5. P. 603–607.
 17. Kotevski A., Koceska N., Koceski S. E-health monitoring system. *International Conference on Applied Internet and Information Technologies*. 2016. P. 259–263.

- 18.Паламар М. І., Стрембіцький М. О., Паламар А. М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 150 с.
- 19.Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі : навч. посіб. Львів : Магнолія 2006, 2013. 256 с.
- 20.Паламар М., Пастернак Ю., Паламар А. Дослідження динамічних похибок системи прецизійного керування антеною з асинхронним електроприводом. *Вісник ТНТУ*. 2014. Вип. 76, № 4. С. 164–173.
- 21.Palamar A. Intelligent control and monitoring module for uninterruptible power supply system. *II International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs»*. Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 12–13.
- 22.Palamar M., Pasternak Y., Palamar A., Poikhalo A. Precision tracking of the trajectory LEO satellite by antenna with induction motors in the control system. *Proceedings of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*. Bucharest, Romania, 2017. Vol. 2. P. 1051–1055.
- 23.Palamar A. Control system simulation by modular uninterruptible power supply unit with adaptive regulation function. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2020. Vol. 98, no. 2. P. 129–136.
- 24.Palamar A. Methods and means of increasing the reliability of computerized modular uninterruptible power supply system. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2020. Vol. 99, no. 3. P. 133–141.
- 25.Palamar A., Karpinskyy M. Control of an Uninterruptible Power Supply in a DC Microgrid System. *10th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering»*. Pärnu, Estonia, 2011. P. 80–84.
- 26.Palamar A., Pettai E. Microgrid for the Department of Electrical Drives and Power Electronics. *8th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering»*. Pärnu, Estonia, 2010. P. 54–61.

- 27.Паламар А. М., Осов'як І. І. Комп'ютерна інформаційно-вимірювальна система для моніторингу пристроїв безперебійного електроживлення. *Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми, перспективи»*. Тернопіль, 2015. С. 111–112.
- 28.ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>
- 29.IoT Based Patient Monitoring System using Sensors to Detect, Analyse and Monitor Two Primary Vital Signs. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1535/1/012004>
- 30.Monitoring System Based on IoT Sensor Data with Complex Event Processing and Artificial Neural Networks for Patient Stress Detection. URL: https://www.researchgate.net/publication/331951035_Monitoring_System_Based_on_IoT_Sensor_Data_with_Complex_Event_Processing_and_Artificial_Neural_Networks_for_Patient_Stress_Detection
- 31.Оптичний давач серцевого ритму Polar OH1. URL: <https://ua.polarua.com/item/opticheskiy-datchik-serdechnogo-ritma-polar-oh1-4410>
- 32.Холтерівська система моніторингу ECGpro Holter EP800. URL: <https://medshop.com.ua/ua/funkcionalna-diagnostika/holterovskisistemi/holterovskaya-sistema-monitoringa-ecgpro-holter-ep800.html>
- 33.Відладочна плата ESP-32. URL: <https://www.robostore.com.ua/ua/otladochnye-platy/esp-moduli/esp-32/>
- 34.The Internet of Things with ESP32. URL: <http://esp32.net/>
- 35.Модуль для зняття ЕКГ AD 8232-Modul Lead Heart Rate Monitor. URL: <https://www.robostore.com.ua/ua/modul-dlya-snyatiya-ekg-ad-8232-modul-lead-heartrate-monitor/>

ДОДАТОК

Код програми мікроконтролера для реалізації процесу моніторингу
показників серцевої діяльності людини

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include "BluetoothSerial.h"
#define LED_BUILTIN 2
#define pinBUZZER 5
#define L0_PLUS 19
#define L0_MINUS 23
#define PULSE_INPUT A0
#define ECG_INPUT A3
#define OLED_Address 0x3C
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define OLED_RESET -1
#define ECG_MIN_LEVEL 100
#define UpperThreshold 1930
#define LowerThreshold 1910
// Global variables
bool BT_cnx = false;
int a = 0;
int lasta = 0;
int lastb = 0;
unsigned long LastTime = 0;
unsigned long ThisTime = 0;
bool BPMTiming = false;
bool BeatComplete = false;
int BPM = 0;
```



```

BluetoothSerial ESP_BT;

Adafruit_SSD1306 oled(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println();
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  pinMode(pinBUZZER, OUTPUT);
  pinMode(L0_PLUS, INPUT);
  pinMode(L0_MINUS, INPUT);
  // Bluetooth initialization
  ESP_BT.register_callback(callback);
  if (!ESP_BT.begin("ESP32_ECG")) {
    Serial.println("An error occurred initializing Bluetooth");
  } else {
    Serial.println("Bluetooth Device is Ready to Pair...");
  }
  // OLED initialization
  oled.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, OLED_Address);
  oled.clearDisplay();
  oled.setTextSize(1);
  oled.setTextColor(WHITE);
  oled.setCursor(0, 10);
  oled.println("Heart Monitoring");
  oled.println("System");
  oled.println();
  oled.println("Created by:");
  oled.println("Ivan Kulias");
  oled.display();
  delay(3000);
}

```

```

oled.clearDisplay();
}
void loop() {

if (digitalRead(L0_MINUS) == HIGH || digitalRead(L0_PLUS) == HIGH) {
  Serial.println("!");
  ESP_BT.println("!");
} else {
  int ECG_signal = analogRead(ECG_INPUT);
  Serial.println(ECG_signal);
  if (BT_cnx) {
    ESP_BT.print("E");
    ESP_BT.println(ECG_signal);
  }
  if (ECG_signal < ECG_MIN_LEVEL) {
    digitalWrite(pinBUZZER, HIGH);
    delay(1000); // buzzer ON for 1 second
  }
}
digitalWrite(pinBUZZER, LOW);

if (a > 127) {
  oled.clearDisplay();
  a = 0;
  lasta = 0;
}
ThisTime = millis();
int value = analogRead(PULSE_INPUT);
oled.setTextSize(2);
oled.setTextColor(WHITE);

```

```

int b = 60 - (value / 64);
oled.drawLine(lasta, lastb, a, b, WHITE);
lastb = b;
lasta = a;
if (value > UpperThreshold) {
    if (BeatComplete) {
        BPM = ThisTime - LastTime;
        BPM = int(60 / (float(BPM) / 1000));
        BPMTiming = false;
        BeatComplete = false;
    }
    if (!BPMTiming) {
        LastTime = millis();
        BPMTiming = true;
    }
}
if (value < LowerThreshold && BPMTiming) {
    BeatComplete = true;
}
oled.fillRect(0, 50, 128, 16, BLACK);
oled.setCursor(0, 50);
oled.print("BPM:");
oled.print(BPM);
oled.display();
a++;
}

void callback(esp_spp_cb_event_t event, esp_spp_cb_param_t *param) {
    if (event == ESP_SPP_SRV_OPEN_EVT) {
        Serial.println("Client Connected");
        digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    }
}

```

```
    BT_cnx = true;
}
if (event == ESP_SPP_CLOSE_EVT) {
    Serial.println("Client Disconnected");
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    BT_cnx = false;
    ESP.restart();
}
}
```