

Житомир 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і
робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри метрології та
інформаційно-вимірювальної техніки
д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

«_22_» _квітня___ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

Суравицька Анастасія Сергіївна

1. Тема роботи: Комп'ютеризована система вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу

Затверджена Наказом по університету від «22» ___квітня___ 2026 р. № 175/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру «19» ___червня___ 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: вивід виміряних значень кисню у крові та частоти пульсу, похибка вимірювання 0.63%.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці):
аналіз сучасних систем вимірювання частоти пульсу та рівня кисню у крові,
розробка структурної схеми, розробка принципової схеми, розробка блок-
схеми алгоритму та програми, розрахунок надійності та точності

5. Перелік графічного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових креслень): структурна схема, принципова схема, друкована плата, блок-
схема алгоритму

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи бакалавра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-7	Подчашинський Ю.О.		

7. Дата видачі завдання 22 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел за темою дипломної роботи	22.04.2026-30.04.2026	
2	Формування мети та завдань	01.05.2026-08.05.2026	
3	Розробка структурної схеми системи	09.05.2026-16.05.2026	
4	Розробка принципової схеми системи та друкованої плати	17.05.2026-23.05.2026	
5	Розробка блок-схеми алгоритму та програми	24.05.2026-29.05.2026	
6	Розрахунок надійності та точності системи	30.05.2026-04.06.2026	
7	Огляд охорони праці	05.06.2026-09.06.2026	
8	Оформлення пояснювальної записки та роздаткового матеріалу	10.06.2026-14.06.2026	

Студент

_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Редчиць О.А.

(прізвище та ініціали)

Подчашинський Ю.О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота бакалавра на тему «Комп'ютеризована система вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу» містить 77 сторінок, 36 рисунків, 16 таблиць, 10 формул, 21 джерело.

У роботі на основі аналізу літературних джерел обґрунтовано актуальність створення комп'ютеризованої системи для одночасного вимірювання рівня сатурації та пульсу. Розроблено структурну та принципову електричну схеми системи, а також спроектовано відповідну друковану плату. Складено блок-схему алгоритму роботи та реалізовано програмне забезпечення пристрою. Виконано розрахунки точності та надійності розробленої системи. Окрему увагу приділено питанням охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях під час експлуатації системи.

Ключові слова: рівень кисню у крові, частота пульсу, мікроконтролер ESP32-C3 SuperMini.

ANNOTATION

Bachelor's thesis on the topic "Computerized System for Measuring Blood Oxygen Saturation Level and Pulse Rate" contains 77 pages, 36 figures, 16 tables, 10 formulas, 21 sources.

In this thesis, based on the analysis of literary sources, the relevance of creating a computerized system for the simultaneous measurement of saturation level and pulse rate is substantiated. The structural and schematic electrical diagrams of the system were developed, and the corresponding printed circuit board was designed. A block diagram of the operation algorithm was constructed, and the software for the device was implemented. Calculations of the accuracy and reliability of the developed system were performed. Special attention is paid to the issues of occupational health and safety in emergency situations during the system's operation.

Keywords: blood oxygen level, pulse rate, ESP32-C3 SuperMini microcontroller.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	8
1.1. Призначення та область застосування.....	8
1.2. Умови експлуатації	8
1.3. Технічні параметри системи.....	8
1.4. Вимоги до конструктивного оформлення.....	9
2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	11
2.1. Загальний опис пульсоксиметра.....	11
2.2. Огляд та аналіз існуючих приладів.....	14
2.3. Порівняльний аналіз приладів.....	19
3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ.....	20
3.1. Опис структурної схеми.....	20
3.2. Обґрунтування мікроконтролера.....	24
3.3. Обґрунтування світлової та звукової сигналізації	27
3.3. Обґрунтування оптичного датчика пульсоксиметрії	30
3.5. Обґрунтування дисплея.....	32
3.6. Обґрунтування кнопки.....	36
3.6. Обґрунтування акумулятора.....	37
3.8. Побудова структурної схеми.....	39
4. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ.....	41
4.1. Вибір мікроконтролера	41
4.2. Вибір світлової та звукової сигналізації.....	42
4.3. Вибір оптичного датчика пульсоксиметрії.....	44
4.4. Вибір дисплея.....	48
4.5. Вибір кнопки.....	49
4.6. Вибір акумулятора.....	51
4.6. Принципова схема.....	52
5. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ТА АЛГОРИТМУ.....	54
5.1. Розробка алгоритму	54
5.2. Розробка програми.....	57
6. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	61
6.1. Розробка друкованої плати.....	61
6.2. Розрахунок похибки.....	63
6.3. Розрахунок надійності.....	66
7. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	70
7.1. Охорона праці.....	70
7.2. Законодавчі акти з охорони праці.....	70
7.3. Безпека життєдіяльності на підприємстві.....	72
7.4. Безпека життєдіяльності в домашніх умовах.....	73
ВИСНОВКИ.....	75
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
ДОДАТКИ.....	78

					МММТ 480.017.017- ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Редчиць О.А.			Комп'ютеризована система вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркшів
Перевірив		Подчашинський Ю.О.					5	77
Рецензент						ДУ «Житомирська політехніка», МТ-5		
Н. контр.								
Затверд.		Подчашинський Ю.О.						

Сучасні технології, що дозволяють вимірювати рівень насичення крові киснем та частоту пульсу, є надзвичайно важливими в медичній сфері, коли своєчасне та точне визначення основних вітальних показників пацієнта може врятувати життя. В умовах стрімкого розвитку телемедицини та дистанційного моніторингу, комп'ютеризовані системи одночасного вимірювання сатурації та пульсу відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного й оперативного медичного обслуговування.

На сьогоднішній день комп'ютеризовані системи вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу широко використовуються в лікарнях, а також у домашніх умовах для експрес-діагностики та постійного контролю стану здоров'я пацієнтів з хронічними захворюваннями легень, серцево-судинними патологіями та під час реабілітації. У перспективі ці пристрої стануть ще більш необхідними у зв'язку зі зростаючою потребою у мобільних засобах експрес-контролю та дистанційного моніторингу здоров'я.

Розробка та впровадження комп'ютеризованих систем вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу стикається з рядом науково-технічних проблем. По-перше, необхідно забезпечити високу точність вимірювань, яка залежить від якості оптичних датчиків та алгоритмів фільтрації артефактів руху й шумів. По-друге, важливим є питання надійності та апаратної оптимізації пристроїв, зокрема проєктування компактних друкованих плат. По-третє, необхідно враховувати умови безпечної експлуатації таких пристроїв, що потребує чіткого аналізу з точки зору охорони праці.

Розробка, що розглядається, спрямована на розв'язання проблеми точного, швидкого та безперервного моніторингу рівня сатурації та пульсу з використанням сучасних мікроконтролерних засобів та оптимізованих алгоритмів обробки фотоплетизмографічного сигналу. Ця розробка має важливе значення як для медичних установ, що прагнуть підвищити якість обслуговування, так і для індивідуальних користувачів для самоконтролю стану організму.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						6
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

На ринку вже існує кілька виробів-аналогів, таких як портативні пульсоксиметри, які використовуються для вимірювання рівня кисню в крові. Проте більшість з них має ряд недоліків, серед яких – недостатня точність при низькій перфузії, відсутність можливості гнучкої інтеграції в локальні комп'ютеризовані системи або збереження історії вимірювань, а також обмежена завадостійкість. Ці недоліки вказують на необхідність розробки нових, більш досконалих та оптимізованих пристроїв.

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є розробка комп'ютеризованої системи вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу з високими показниками точності та надійності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- 1.Сформулювати технічне завдання;
- 2.Провести аналіз літературних джерел та існуючих технічних рішень за темою дипломної роботи;
- 3.Розробити структурну схему комп'ютеризованої системи;
- 4.Розробити принципову електричну схему системи та спроектувати друковану плату;
- 5.Розробити блок-схему алгоритму роботи та відповідну програму для мікроконтролера;
- 6.Виконати розрахунок надійності та точності вимірювальної системи;
- 7.Провести огляд питань з охорони праці та безпеки під час експлуатації пристрою.

					МММТ 480.017.017– ПЗ	Арк.А
						7
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1.1. Призначення та область застосування

Комп'ютеризована система вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу призначена для безперервного або експрес-моніторингу ключових гемодинамічних показників людського організму: рівня сатурації (SpO₂) капілярної крові киснем та частоти серцевих скорочень.

Областю застосування даної комп'ютеризованої системи є:

- Клінічна медицина: відділення інтенсивної терапії, пульмонологічні та кардіологічні стаціонари, карети швидкої медичної допомоги для оперативного контролю стану пацієнтів з респіраторними чи серцево-судинними патологіями;
- Телемедицина та амбулаторне лікування: системи дистанційного моніторингу, які дозволяють лікарям віддалено контролювати стан здоров'я хронічних хворих, що перебувають на домашньому лікуванні;
- Індивідуальне (побутове) використання: самоконтроль стану здоров'я людьми похилого віку, пацієнтами в період реабілітації після перенесених легеневих захворювань, а також контроль загального стану під час домашнього догляду;
- Спортивна медицина: моніторинг адаптації організму спортсменів до фізичних навантажень та гіпоксії під час тренувань чи високогірних сходжень.

1.2. Умови експлуатації

Для забезпечення стабільного функціонування, збереження технічних характеристик та надійності комп'ютеризованої системи вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу, необхідно дотримуватися таких умов експлуатації:

Кліматичні чинники:

- Діапазон робочих температур: від +5 до +40 °C;

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						8
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

- Відносна вологість повітря: не більше 80% при температурі +25 °C (без конденсації вологи);
- Атмосферний тиск: від 84 до 106,7 кПа.

Система призначена для використання у приміщеннях (лікарняні палати, лабораторні або домашні умови) за нормальних умов навколишнього середовища. Конструкція корпусу вимагає захисту від потрапляння всередину рідин, біологічних матеріалів та пилу.

Пристрій у транспортній тарі повинен витримувати вібраційні та механічні навантаження, що виникають під час транспортування автомобільним або іншими видами транспорту згідно з чинними стандартами.

Система повинна мати захист від зовнішніх електромагнітних завад та не створювати критичних завад для іншого медичного або побутового обладнання в межах стандартних значень, визначених для медичних виробів.

Автономне джерело: батарейки типу ААА (3 одиниці, сумарна напруга 4,5 В) із необхідністю регулярного контролю рівня їхнього заряду.

Режим роботи: повторно-короткочасний або перервний (періодичне проведення сеансів вимірювання з подальшим переходом системи в енергоощадний режим сну).

Комп'ютеризована система є повністю ремонтпридатною. Усі апаратні компоненти (оптичний датчик, мікроконтролер, дисплей, елементи обв'язки плат) є уніфікованими та доступними на ринку, що дозволяє швидко відновлювати працездатність пристрою шляхом модульної або компонентної заміни несправних елементів.

1.3. Технічні параметри системи

Комп'ютеризована система вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу має чітко визначену структуру вхідних і вихідних інформаційних та живильних потоків.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						9
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Вхідна інформація та сигнали системи:

1.Керуючий вхід: використовується для прийому дискретного сигналу від тактової кнопки керування, призначеної для увімкнення/вимкнення пристрою, ініціалізації початку сеансу вимірювання або скидання поточних метрологічних показників на екрані.

2.Основне джерело вхідної інформації: цифровий оптичний датчик-пульсоксиметр. Первинна інформація про зміну оптичної щільності тканин пальця під час пульсації крові (для двох довжин хвиль: червоного світла 660 нм та інфрачервоного 880 нм) надходить до мікроконтролера у вигляді цифрового коду через послідовний синхронний інтерфейс I2C.

3.Вхід електроживлення: постійна напруга до 4.5 В від трьох батарейок типу ААА). Через систему лінійних стабілізаторів та фільтрації подається на мікроконтролер та периферійні модулі.

Вихідна інформація та сигнали системи:

– Основний вихід даних: цифрові значення обчислених параметрів (рівень насичення крові киснем SpO2 у відсотках та частота пульсу в ударах за хвилину), які виводяться на малогабаритний графічний OLED-дисплей у режимі реального часу.

– Світлодіодна індикація: надяскраві SMD-світлодіоди, які сигналізують про поточний стан пристрою (процес заряджання акумулятора, увімкнення режиму вимірювання, стабільне зчитування пульсу або критичний рівень розряду батареї).

Центральною керуючою ланкою системи є мікроконтролер. Він функціонує за чітким алгоритмом: здійснює конфігурування оптичного датчика, зчитує цифрові значення інтенсивності відбитого/пропущеного світла, реалізує алгоритми цифрової фільтрації (для відсікання випадкових шумів та артефактів руху руки), обчислює за амплітудами сигналів рівень сатурації SpO2, визначає частоту серцевих скорочень за часовими інтервалами між піками ФПГ-хвилі, формує пакети вихідних даних та керує OLED-індикатором.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						10
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Технічні характеристики системи та її складових частин:

–Точність вимірювання: абсолютна похибка визначення рівня насичення крові киснем (SpO2) у діапазоні 70–100% не перевищує $\pm 1.0\%$;

–Абсолютна похибка вимірювання частоти пульсу становить не більше ± 2 уд/хв у всьому робочому діапазоні.

–Діапазон вимірювання частоти пульсу: від 30 до 250 уд/хв;

– Напрацювання на безвідмовну роботу становить не більше 14 500 годин.

Вимірювальний елемент: цифровий оптичний MEMS-модуль пульсоксиметрії із вбудованим 18-бітним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП), інтегрованими світлодіодами червоного та інфрачервоного спектрів і низьким рівнем енергоспоживання (наявний режим "Smart SpO2" для збереження енергії).

1.4. Вимоги до конструктивного оформлення

Корпус комп'ютеризованої системи вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу виготовлений з міцного, ударостійкого та нетоксичного пластика (наприклад, ABS-пластика), що забезпечує належний захист внутрішніх електронних компонентів від механічних пошкоджень та зносу. Конструкція пристрою має ергономічну форму та компактні габаритні розміри, що дозволяє зручно утримувати його в руці, закріплювати на пальці або транспортувати. Розміри повинні бути в межах 54x80x 30мм мм. Усі внутрішні елементи системи надійно зафіксовані всередині корпусу за допомогою спеціальних пазів та кріплень, що запобігає їх зміщенню або поломці під час експлуатації в умовах трясіння, вібрацій чи руху пацієнта.

Для забезпечення функціональності та зручності взаємодії з користувачем на корпусі пристрою передбачено конструктивні елементи та отвори.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		11

2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

2.1. Загальний опис пульсоксиметра

Для контролю стану пацієнта застосовується неінвазивний оптичний метод – пульсоксиметрія. Він дозволяє безкровно визначити відсоток насичення гемоглобіну киснем, аналізуючи ступінь поглинання світла тканинами на периферійних ділянках тіла (пальцях рук чи ніг). Апаратне вимірювання цих показників здійснюється за допомогою пульсоксиметра. Цей пристрій забезпечує одночасний автоматизований моніторинг двох ключових параметрів життєдіяльності організму: рівня сатурації (SpO₂) та частоти пульсу.

Типовий приклад та опис пульсоксиметра показано на рис.2.1 та рис.2.2.



Рис.2.1. Пульсоксиметр модель C101A4



Рис.2.2 Інтерфейс пульсоксиметра модель C101A4

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		12

Конструкція оптичного сенсора пульсоксиметра містить два світлодіоди, що працюють у різних спектральних діапазонах: червоному (довжина хвилі близько 660 нм) та інфрачервоному (довжина хвилі близько 940 нм). Під час проходження оптичного випромінювання крізь біологічні тканини відбувається його часткове поглинання компонентами крові, після чого залишковий світловий потік фіксується фотодетектором (працює на просвіт або на відбиття).

В основі розрахунку лежить різниця спектральних характеристик поглинання двох основних форм гемоглобіну: оксигемоглобіну (HbO_2) та дезоксигемоглобіну (Hb). Оксигенований гемоглобін має вищий коефіцієнт екстинкції в інфрачервоній області, тоді як відновлений гемоглобін інтенсивніше поглинає червоне світло. Аналізуючи співвідношення амплітуд поглинання цих двох світлових хвиль, мікроконтролерна система обчислює точний відсоток сатурації.[1]

Принцип роботи приладу зображений на рис.2.3..

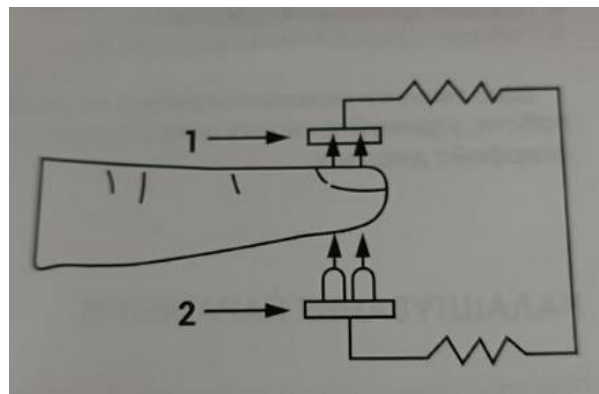


Рис.2.3 Принцип вимірювання пульсоксиметра

де: 1-випромінювач інфрачервоного світла; 2-отримувач інфрачервоного світла.

Сатурація (SpO_2) – це відсоток оксигенованого гемоглобіну від загального обсягу гемоглобіну в крові. Нормальні значення сатурації для здорової людини знаходяться в межах 95-100%. Рівні нижче 90% можуть свідчити про гіпоксемію, що потребує медичного втручання.[2]

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		13

Формула(2.1) для розрахунку сатурації базується на співвідношенні поглинання червоного та інфрачервоного світла.

$$SpO_2 = \left(1 - \frac{R}{Q}\right) \times 100\% \quad (2.1)$$

де: R – відношення інтенсивності поглинання червоного світла дезоксигемоглобіном (Hb) до інтенсивності поглинання червоного світла оксигемоглобіном (HbO₂); Q – відношення інтенсивності поглинання інфрачервоного світла дезоксигемоглобіном (Hb) до інтенсивності поглинання інфрачервоного світла оксигемоглобіном (HbO₂).

Ця формула відображає принцип оцінки різниці у поглинанні світла різними типами гемоглобіну, що дозволяє визначити відсоток оксигенованого гемоглобіну.

2.2.Огляд та аналіз існуючих приладів

На сьогоднішній день ринок медичної техніки пропонує широкий асортимент пульсоксиметрів від різноманітних світових виробників. Попри певні конструктивні та функціональні відмінності, всі вони виконують єдину базову функцію – високоточне вимірювання рівня сатурації (SpO₂) та частоти серцевих скорочень. Наявні прилади класифікують за рядом технічних характеристик, конструктивним виконанням та областю застосування.

Розглянемо та проведемо порівняльний аналіз чотирьох сучасних аналогів пульсоксиметрів: професійних моніторів пацієнта Neaso CMS60D та ZUG MEDICAL WIT-S300, класичного портативного експрес-приладу Contec CMS50D, а також бездротового смарт-монітора Viatom PO6. Детальний огляд, класифікаційні ознаки та порівняльний аналіз сучасних вимірювальних пристроїв наведено нижче у табл. 2.4–2.7 та проілюстровано на рис. 2.4–2.7.

На рис.2.4 представлений пульсоксиметр Neaso CMS60D.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		14



Рис.2.4. Пульсоксиметр Неасо CMS60D

Пульсоксиметр Неасо CMS60D – компактний та легкий прилад, що дозволяє контролювати частоту пульсу пацієнта, насиченість його крові киснем (SpO2) та інтенсивність імпульсу (бар-графік).

У ньому використовується технологія фотоелектричного контролю оксигемоглобіну відповідно до технології сканування та запису імпульсів емпності, яку можна використовувати для вимірювання насичення киснем людини та частоти пульсу за допомогою пальця. Пристрій підходить для використання як вдома, так і в лікарні.[3]

Табл.2.1. Технічні характеристики пульсоксиметра Неасо CMS60D

Параметр	Значення Неасо CMS60D
Діапазон вимірювання SpO2	0–100%
Точність вимірювання SpO2	±2% у діапазоні 70–100% (для дорослих/дітей); ±3% у діапазоні 70–100% (для новонароджених)
Діапазон вимірювання частоти пульсу	25–250 ударів на хвилину
Точність вимірювання частоти пульсу	±3 удари на хвилину (або ±2% у деяких модифікаціях)
Тип дисплея	Кольоровий 1,8-дюймовий TFT/OLED дисплей з регулюванням яскравості
Формати відображення	Відображення значень SpO2, ЧСС, бар-графіка інтенсивності пульсу та хвилі плетизмограми; можливість зміни напрямку екрана
Автоматичне вимкнення	Автоматичне переходження в режим енергозбереження/вимкнення у разі тривалої відсутності сигналу

Живлення	2 батарейки типу AA (пальчикові) або живлення через USB-кабель
Час роботи від батарейок	До 32 годин безперервної роботи
Розміри	110 x 60 x 24 мм (або 112 x 62 x 28 мм залежно від ревізії корпусу)
Вага	Близько 100 грамів (без батарейок) / ~136 грамів (із елементами живлення)
Діапазон робочих температур	від 0 до +40 °C
Діапазон робочої вологості	15–95% (без конденсації)
Діапазон температур зберігання	від -20 до +60 °C
Діапазон вологості зберігання	10–95%

На рис.2.5 представлений пульсоксиметр ZUG MEDICAL WIT-S300.



Рис.2.5. Пульсоксиметр ZUG MEDICAL WIT-S300

Пульсоксиметр ZUG MEDICAL WIT-S300 – професійний портативний ручний (hand-held) пульсоксиметр, призначений для використання у клініках, стаціонарах, під час транспортування пацієнтів, а також для точного домашнього моніторингу.

На відміну від звичайних пальцевих пульсоксиметрів-прищіпок, цей пристрій належить до класу моніторів пацієнта виносного типу. Він обладнаний великим кольоровим екраном, підтримує підключення різних видів датчиків (дорослих, дитячих, неонатальних на лапу) та має розширений функціонал, включаючи визначення індексу перфузії (PI), пам'ять для збереження трендів та вбудовану систему звукової і світлової тривоги.[4]

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		16

Таблиця.2.2. Технічні характеристики ZUG MEDICAL WIT-S300

Параметр	Значення MEDICAL WIT-S300
Діапазон вимірювання SpO ₂	0–100%
Точність вимірювання SpO ₂	±2% у діапазоні 70–100%
Діапазон вимірювання частоти пульсу	25–250 ударів на хвилину
Точність вимірювання частоти пульсу	±2 удари на хвилину або ±2%
Вимірювання індексу перфузії (PI)	Є, діапазон від 0% до 20%
Тип дисплея	Кольоровий 3,2-дюймовий HD рідкокристалічний екран (ЖК / TFT)
Формати відображення	Одночасне виведення числових значень SpO ₂ , ЧП, PI, бар-графіка інтенсивності пульсу, хвилі плетизмограми, а також стану заряду та системних сповіщень
Додаткові функції та тривоги	Подвійна система тривоги (налаштовувані звукові та світлові сигнали при виході параметрів за межі), збереження історії вимірювань (трендів) до 72 годин
Живлення	Вбудований та змінний літєвий акумулятор (заряджання через USB-C / док-станцію) або можливість роботи від 3-х батарейок типу AA
Час роботи від акумулятора	До 12 годин безперервної роботи в автономному режимі
Інтерфейси зв'язку	USB для підключення до ПК (передача даних через спеціальне ПЗ), опціонально вбудований Bluetooth
Розміри	143 x 80 x 30 мм
Вага	Близько 500 грамів (у повному зборі з акумулятором)
Діапазон робочих температур	від +5 до +40 °C
Діапазон робочої вологості	15–95% (без конденсації)

На рис.2.6. представлений пульсоксиметр Contec CMS50D.



Рис.2.6 Пульсоксиметр Contec CMS50D

Портативний пульсоксиметр Optimum CMS50D слугує для експрес-визначення ступеня насичення крові киснем. Апаратна частина пристрою інтегрована зі світлодіодним (LED) дисплеєм, який відрізняється мінімальним рівнем споживання енергії, завдяки чому забезпечується висока автономність системи під час тривалого моніторингу пацієнта. Завдяки оптимізованим масогабаритним показникам, ергономічному корпусу та низькій похибці вимірювання, цей прилад є універсальним рішенням для експлуатації як у клінічних, так і в польових або домашніх умовах.[5]

Табл.2.3. Технічні характеристики пульсоксиметра Contec CMS50D

Діапазон вимірювання SpO ₂	70% до 99%
Точність вимірювання SpO ₂	±2% від 70% до 99% і без визначення для значень менше 70%
Діапазон вимірювання частоти пульсу	30 до 250 ударів на хвилину
Точність вимірювання частоти пульсу	±2 удари на хвилину або ±2%
Тип дисплея	LED
Живлення	літієва батарея CR2032
Розміри	58 x 32 x 34 мм
Вага	близько 50 грамів (з батареєю)

Пульсоксиметр Viatom PO6 (рис.2.7) забезпечує точне та комфортне вимірювання SpO₂ і частоти пульсу (PR), використовуючи медичну технологію, що застосовується у лікарнях. Завдяки інноваційному м'якому сенсору у формі «дзьоба качки» пристрій щільно, але без тиску прилягає до пальця, забезпечуючи максимальний комфорт навіть при тривалому використанні.

На відміну від звичайних побутових пульсоксиметрів, Viatom PO6 підтримує не лише миттєве вимірювання, а й безперервний моніторинг. Вбудована пам'ять дозволяє зберігати до 4 сеансів по 1 годині кожен, щоб відстежувати зміни рівня кисню та пульсу з часом. Це особливо корисно для

людей із хронічними захворюваннями дихальної системи, спортсменів та під час сну.



Рис.2.7. Пульсоксиметр Viatom PO6

Пульсоксиметр оснащений звуковою сигналізацією, яка спрацьовує, коли показники виходять за межі встановлених користувачем значень. Таким чином, ви миттєво дізнаєтеся про зниження рівня кисню або нерегулярний пульс. Це надійне рішення для щоденного контролю стану здоров'я без необхідності постійно дивитися на екран.

За допомогою Bluetooth-з'єднання пристрій можна синхронізувати зі смартфоном через безкоштовний застосунок для iOS та Android. У ньому можна переглядати історію вимірювань у вигляді графіків, зберігати дані та ділитися результатами з лікарем. Яскравий OLED-дисплей чітко відображає показники навіть при яскравому освітленні, а вбудований акумулятор забезпечує роботу до 14 годин без підзарядки.[6]

Табл.2.7. Техніні характеристики пульсоксиметра Viatom PO6

Параметр	Значення для Viatom PO6 (Oxyfit)
Діапазон вимірювання SpO2	0–100% (ефективний клінічний діапазон: 70–100%)
Точність вимірювання SpO2	±2% у діапазоні 80–100%; ±3% у діапазоні 70–80%
Діапазон вимірювання частоти пульсу	30–250 ударів на хвилину (bpm)
Точність вимірювання частоти пульсу	±2 уд/хв або ±2% (залежно від того, що більше)

Вимірювані параметри	Рівень кисню (SpO ₂), частота пульсу (PR), індекс перфузії (PI), рух (Motion)
Тип дисплея	Яскравий 0,69-дюймовий монохромний OLED-дисплей
Вбудована пам'ять	Зберігає до 4 сеансів запису (по 1 годині на кожен сеанс; інтервал запису даних кожні 4 секунди)
Звукова сигналізація (Alarm)	Вбудований зумер (сигналізує про вихід за налаштовані межі SpO ₂ або частоти пульсу)
Бездротовий інтерфейс	Bluetooth 4.2 BLE (підтримка мобільного додатка ViHealth для iOS / Android)
Живлення	Вбудований перезаряджуваний літій-полімерний акумулятор 3.7 В
Час роботи та заряджання	12–14 годин безперервної роботи; час повного заряджання через USB 2–3 години
Розміри	38 x 30 x 38 мм
Вага	Всього 28 грамів (разом із вбудованим акумулятором)
Умови експлуатації	Температура: від +5 до +40 °С; вологість: 10–95% (без конденсації)

2.3. Порівняльний аналіз приладів

Для визначення оптимальної архітектури та функціоналу власної комп'ютеризованої системи було проведено порівняльний аналіз розглянутих серійних виробів за ключовими метрологічними, конструктивними та експлуатаційними параметрами. Узагальнені результати порівняння наведено у зведеній таблиці 2.8.

Таблиця 2.8. Порівняльна таблиця аналогів

Критерій порівняння	Heaco CMS60D	ZUG MEDICAL WIT-S300	Contec CMS50D	Viatom PO6 (Oxyfit)
Клас пристрою	Портативний / Настільний монітор	Професійний ручний монітор пацієнта	Портативний пальцевий експрес-прилад	Бездротовий смарт-монітор тривалого носіння
Діапазон SpO ₂	0–100%	0–100%	70–99%	70–100% (ефективний)

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		20

Точність SpO ₂	±2% (дорослі) / ±3% (неонатал)	±2%	±2%	±2% (у верхньому діапазоні)
Вимірювання індексу перфузії (PI)	Відсутнє	Є (0–20%)	Відсутнє	Є
Режим моніторингу	Експрес та безперервний	Безперервний, клінічний	Тільки короткочасний експрес	Безперервний, нічний / спортивний
Тип датчика	Виносний провідний (змінний)	Виносний провідний (змінний)	Інтегрований у корпус (прищіпка)	Інтегрований еластичний («качиний дзьоб»)
Енергоживлення	2 батарейки AA / USB	Li-Ion акумулятор / 3 батарейки AA	Батарейка CR2032 або 2хAAA	Вбудований Li- Po акумулятор 3.7 В
Інтерфейси зв'язку	USB	USB / Bluetooth	Відсутні	Bluetooth 4.2 BLE
Габарити та вага	110х60х24 мм; ~136 г	143х80х30 мм; ~500 г	58х32х34 мм; ~500 г (уніфік.)	38х30х38 мм; 28 г

Незважаючи на велику різноманітність наявних ринкових рішень, детальний аналіз виявив чіткий поділ аналогів на дві полярні категорії, кожна з яких має суттєві недоліки для специфічних умов індивідуального або амбулаторного використання:

1.Професійні медичні монітори (Heaso CMS60D, ZUG MEDICAL WIT-S300): Мають високу точність, підтримують тривалий моніторинг та роботу з графіками (плетизмограмою). Проте вони є досить габаритними, важкими (до 500 г) та мають високу вартість, що робить їх малодоступними для масового побутового використання або індивідуальної комплектації аптечок. Крім того, передача даних на ПК у них зазвичай вимагає специфічного дротового ПЗ, що обмежує мобільність пацієнта.

2.Бюджетні побутові пульсоксиметри (Contec CMS50D та аналоги): Мають низьку вартість і високу компактність, але призначені виключно для короткочасного експрес-вимірювання (сеанс 10–15 секунд). Вони повністю непридатні для безперервного нічного чи тривалого моніторингу через жорстку конструкцію кліпси, яка здавлює капіляри та викликає оніміння

пальця, а також не мають функцій бездротового логування даних у реальному часі.

3. Спеціалізовані бездротові пристрої (Viatom PO6): Резюмують у собі сучасні тренди (м'який датчик, Bluetooth), проте обмежуються лише внутрішніми мобільними додатками без прямої та гнучкої інтеграції у локальні комп'ютерні системи моніторингу або відкриті дослідницькі бази даних.

Таким чином, розробка власної комп'ютеризованої системи вимірювання є повністю обґрунтованою та актуальною з огляду на такі фактори:

- Поєднання переваг різних класів: Створення пристрою, який буде водночас легким, портативним та доступним (як побутова "прищипка"), але підтримуватиме алгоритми безперервного накопичення даних та фільтрації артефактів руху (як професійний монітор).

- Гнучкість програмної інтеграції: Власна розробка дозволяє реалізувати відкритий протокол передачі інформації через апаратний інтерфейс (UART/USB/Wi-Fi) безпосередньо на персональний комп'ютер або локальний сервер. Це забезпечує можливість довгострокового збереження, математичної обробки фотоплетизмографічного сигналу та інтеграції в системи телемедицини.

- Економічна доцільність та імпортозаміщення: Використання доступної, уніфікованої компонентної бази (сучасні цифрові оптичні сенсори типу MAX30102 та мікроконтролери типу ATmega328P/ESP32) дозволяє суттєво знизити собівартість вимірювального вузла при збереженні високої метрологічної точності (похибка в межах медичних стандартів — $\pm 2\%$).

- Можливість кастомізації алгоритмів: Власний програмний код дає змогу гнучко налаштовувати межі спрацьовування звукової/світлової сигналізації, калібрувати обчислення сатурації під індивідуальні особливості пацієнта (індекс перфузії, товщина шкіри) та впроваджувати власні алгоритми цифрової фільтрації шумів високої частоти.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						22
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

3.1. Опис структурної схеми

Комп'ютеризована система вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу повинна виконувати такі основні функції:

1. Вмикання та вимикання вимірювального пристрою, а також переведення його в енергоощадний режим;
2. Вимірювання рівня сатурації артеріальної крові (насичення крові киснем SpO_2) та частоти серцевих скорочень (ЧСС);
3. Швидка цифрова обробка сигналу, оперативне отримання результатів вимірювання та їх виведення на локальний графічний дисплей;
4. Мобільність, автономність та ергономічність під час практичного використання.

Структурна схема пульсоксиметра включає в себе декілька основних компонентів, які працюють разом для вимірювання рівня насичення крові киснем (SpO_2).

Опис основних елементів структури та їхніх функцій наведено нижче:

– Мікроконтролер (МК): центральний обчислювальний та керуючий вузол системи. Він приймає вимірювальні сигнали від датчиків, реалізує алгоритми цифрової фільтрації та математичного розрахунку сатурації (SpO_2) і частоти пульсу, координує роботу пристроїв індикації, звукового сповіщення та зчитує команди користувача.

– Датчик вмісту кисню у крові та частоти пульсу: первинний вимірювальний перетворювач (оптичний датчик). Він здійснює безпосереднє зондування тканин, детектує інтенсивність світлового потоку, що пройшов через судинне русло пацієнта, і передає інформаційний сигнал на вхід мікроконтролера у вигляді даних для подальшої обробки.

– Червоний світлодіод: виконавчий елемент оптичного вимірювального тракту. Керується безпосередньо мікроконтролером, який забезпечує його

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						23
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

циклічне або синхронне ввімкнення з необхідною частотою та тривалістю імпульсів для забезпечення коректної роботи фотодетектора.

– Акумулятор: автономне джерело електроживлення. Забезпечує подачу постійної напруги та струму, необхідних для стабільного функціонування мікроконтролера та всіх підключених до нього периферійних модулів.

– Дисплей: основний модуль візуалізації вихідних даних. Приймає від мікроконтролера обчислені цифрові значення (рівень сатурації у відсотках, частоту серцевих скорочень) та графічні дані для відображення результатів вимірювання у зручному для користувача вигляді.

– Динамік (зумер): пристрій звукової сигналізації. Отримує керуючі сигнали від МК для генерації звукових сповіщень при ввімкненні системи, успішному завершенні сеансу вимірювання або у разі виходу метрологічних показників за критичні встановлені межі (функція тривоги).

– Кнопка: елемент ручного керування та інтерфейсу користувача. При натисканні формує дискретний сигнал, що надходить на вхід мікроконтролера, ініціюючи процеси увімкнення/вимкнення, скидання показників або зміни режимів роботи пристрою.

3.2. Обґрунтування мікроконтролера

Мікропроцесор – це центральний компонент комп'ютерних систем та вбудованих пристроїв, який виконує основні обчислювальні завдання. Він інтегрує функції центрального процесора на одному або декількох інтегральних схемах. Мікропроцесор здійснює виконання програмного коду, управління системними ресурсами та обробку даних.[7]

Для забезпечення ефективного функціонування комп'ютеризованої системи вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу, до центрального обчислювального компонента (мікроконтролера) висувається ряд суворих технічних та експлуатаційних вимог.

					МММТ 480.017.017– ПЗ	Арк.А
						24
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Висока обчислювальна продуктивність: необхідна для реалізації алгоритмів цифрової фільтрації фотоплетизмографічного сигналу в режимі реального часу, згладжування шумів та точної фіксації екстремумів пульсової хвилі.

Достатній обсяг пам'яті: наявність енергонезалежної (Flash) та оперативної (RAM) пам'яті для тимчасового логування результатів вимірювань, збереження індивідуальних налаштувань користувача та збереження короткострокових трендів SpO₂.

Підтримка сучасних інтерфейсів зв'язку: обов'язкова наявність апаратних периферійних модулів I2C/TWI (для комунікації з цифровим оптичним датчиком та OLED-дисплеєм), UART (для налагодження та дротового зв'язку з EOM), а також інтегрованих бездротових протоколів Bluetooth та Wi-Fi для інтеграції пристрою в локальні медичні мережі або передачі даних на мобільні платформи.

Енергоефективність: низьке енергоспоживання в робочому режимі та наявність гнучких режимів глибокого сну (Deep Sleep), а також здатність стабільно функціонувати в діапазоні низьких напруг живлення від 2,5 В до 3,6 В для максимального подовження ресурсу автономного джерела (батареї).

Масогабаритні показники: мініатюрні розміри корпусу мікросхеми, що дозволяє спроектувати компактну та ергономічну друковану плату для портативного використання пристрою.

Стандартизація та сертифікація: відповідність компонентної бази міжнародним стандартам якості та електромагнітної сумісності.

Табл.3.1.Порівняльна характеристика мікроконтролерів

Виробник	Переваги
Tensilica Xtensa	Висока продуктивність, енергоефективність, інтегровані комунікаційні модулі, гнучкість конфігурації
ARM Cortex	Широка підтримка і популярність, висока продуктивність і енергоефективність, гнучкість, безпека
AVR	Простота використання, велика спільнота, доступність і низька вартість, низьке енергоспоживання

У процесі проектування було проведено аналіз сучасного ринку мікроконтролерів та розглянуто архітектури від провідних виробників, зокрема: AVR (Microchip/Atmel), ARM Cortex (STMicroelectronics) та Tensilica Xtensa (Espressif Systems). Зведені дані представлені в таблиці 3.1.

Попри те, що всі згадані архітектури широко застосовуються в інженерній практиці, як апаратна основа цієї системи було обрано 32-бітний двоядерний мікроконтролер ESP32 на базі архітектури Tensilica Xtensa.

Дане рішення повністю обґрунтоване тим, що мікроконтролер ESP32 найкраще задовольняє комплекс поставлених вимог. Він поєднує в собі високу тактову частоту (до 240 МГц) і значний обсяг пам'яті з уже інтегрованими на кристал радіомодулями Wi-Fi та Bluetooth, що усуває потребу в розведенні додаткових зовнішніх мікросхем зв'язку. Крім того, простота програмного проектування, низька ринкова вартість компонентів та наявність ефективних режимів енергозбереження роблять його оптимальним вибором для реалізації мобільного медико-інженерного вимірювального пристрою.[8]

Для обґрунтування вибору апаратної основи системи було проведено аналіз внутрішньої лінійки мікроконтролерів сімейства ESP32 від компанії Espressif Systems. Для порівняння було обрано класичний двоядерний модуль ESP32 WROOM, мініатюрну двоядерну версію ESP32-PICO, а також сучасний одноядерний чіп ESP32-C3 у виконанні SuperMini.

Порівняльні технічні характеристики модифікацій всередині лінійки наведено у таблиці 3.2.

Табл.3.2. Порівняльна характеристика модулів сімейства ESP32

Модель	Кількість ядер та архітектура	Габаритні розміри	Обсяг пам'яті (SRAM / Flash)	Версія Bluetooth
ESP32 WROOM (DevKitC)	2 ядра, Tensilica Xtensa LX6 (до 240 МГц)	48,2 мм x 27,9 мм (30/38 pin)	520 КБ / 4 МБ	Bluetooth 4.2 BR/EDR та BLE
ESP32-PICO-KIT	2 ядра, Tensilica Xtensa LX6 (до 240 МГц)	52,0 мм x 20,3 мм (20 pin)	520 КБ / 4 МБ	Bluetooth 4.2 BR/EDR та BLE
ESP32-C3 SuperMini	1 ядро, RISC-V (до 160 МГц)	22,5 мм x 18,0 мм (16 pin)	400 КБ / 4 МБ	Bluetooth 5.0 (BLE)

Аналіз внутрішнього модельного ряду ESP32 показав, що для проектування портативного медичного вимірювача модифікація ESP32-C3 SuperMini є найбільш оптимальною з огляду на такі фактори.

Мініатюризація корпусу: Класичні плати розробки ESP32 (WROOM/DevKit) є занадто громіздкими для кишенькового приладу. Версія SuperMini має габарити всього 22,5x18,0 мм (16 виводів), що дозволяє спроектувати друковану плату мінімальної площі.

Енергоефективність архітектури RISC-V: На відміну від потужних, але енергоємних двоядерних процесорів Xtensa, які використовуються у базових ESP32, модель C3 побудована на сучасному енергоефективному ядрі RISC-V. Це дозволяє значно знизити струм споживання пристрою у робочому режимі та продовжити термін служби акумулятора.

Оновлений радіоканал: У порівнянні зі старим протоколом Bluetooth 4.2, який інтегровано в перші ревізії ESP32, модифікація C3 підтримує Bluetooth 5.0 Low Energy (BLE). Це забезпечує енергоефективну та стабільну бездротову передачу даних на смартфон або ПК без швидкого розряду батареї.

Достатність інтерфейсів: Наявних 16 виводів (pin) плати повністю вистачає для реалізації схеми (підключення датчика кисню по I2C, OLED-екрана, кнопки та динаміка) без появи надлишкових невикористаних контактів.

3.3. Обґрунтування світлової та звукової сигналізації

Для підвищення ергономічності, безпеки експлуатації та забезпечення оперативного зворотного зв'язку з користувачем (пацієнтом або медичним персоналом), у розроблюваній комп'ютеризованій системі реалізовано комбінований інтерфейс сповіщення. Він складається з двох виконавчих елементів: динаміка (зумера) та червоного світлодіода (LED-індикатора).

Світлодіод (LED) – це напівпровідниковий прилад, який випромінює світло при проходженні через нього електричного струму. Світлодіоди є

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						27
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

енергоефективними, мають тривалий термін служби і використовуються в різних пристроях, таких як освітлення, дисплеї, індикатори, пульти дистанційного керування та медичні прилади.[9]

Червоний світлодіод випромінює світло в діапазоні довжин хвиль від приблизно 620 до 750 нанометрів. Мають високу ефективність перетворення електричної енергії в світло, що робить їх економічно вигідними. Тривалий термін служби, зазвичай від 20 000 до 50 000 годин. Використовують зазвичай для індикації, освітлення.[10]

На рис.3.1 представлено зображення різних видів світло діодів.

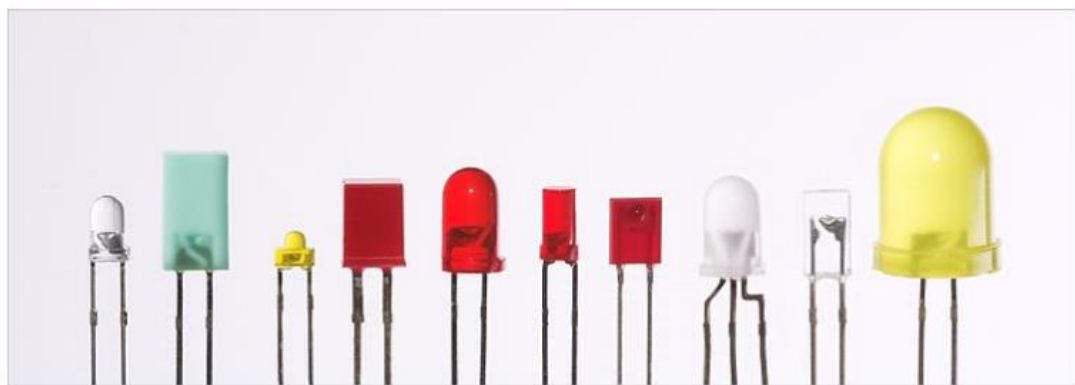


Рис.3.1 Зображення різних типів світлодіодів

Для реалізації функції звукової сигналізації (акустичного сповіщення) у комп'ютеризованій системі було проведено аналіз компонентної бази звукових випромінювачів. Головними вимогами до цього елемента є: мінімальні габаритні розміри, низьке енергоспоживання, простота керування за допомогою мікроконтролера ESP32-C3 та достатній рівень гучності для надійного сприйняття сигналів тривоги пацієнтом.

У сучасній мікроелектроніці за принципом дії звукові випромінювачі поділяють на дві основні групи:

1.Електромагнітні (динамічні) зумери: працюють за принципом коливання котушки в магнітному полі. Вони мають вищий струм споживання та потребують додаткових драйверів або транзисторних ключів для підключення до слабкострумівих виводів мікроконтролера.

2.П'єзоелектричні випромінювачі (п'єзодинаміки / пасивні п'єзозумери): функціонують на основі п'єзоелектричного ефекту, де звук виникає внаслідок деформації п'єзокерамічної пластини під дією змінного електричного поля.

За типом генерації звуку випромінювачі поділяються на активні (мають вбудований генератор частоти і звучать постійно при подачі постійної напруги) та пасивні (потребують зовнішнього ШІМ-сигналу з мікроконтролера для створення звуку певної тональності).



Рис.3.2. П'єзоелектричний зумер

Для розроблюваної системи було обрано пасивний п'єзоелектричний випромінювач (наприклад, типу ЗП-1 чи аналогічний мініатюрний SMD/DIP п'єзозумер рис.3.2). Даний вибір повністю обґрунтований такими інженерними перевагами:

1.Низьке енергоспоживання: п'єзоелектричні елементи мають високий внутрішній опір, тому вони споживають мінімальний струм (до 10–15 мА). Це дозволяє підключати їх безпосередньо до цифрового виводу (GPIO) мікроконтролера ESP32-C3 без ризику перевантаження порту та без використання додаткових транзисторів.

2.Гнучкість налаштування тональності: використання саме пасивного зумера дозволяє програмно, за допомогою зміни частоти ШІМ-сигналу з мікроконтролером, генерувати звуки різної частоти та тривалості. Це необхідно для розділення сигналів.

3.Масогабаритні показники: п'єзодиски мають ультратонкий профіль та діаметр корпусу в межах 9–12 мм, що ідеально відповідає концепції компактного портативного пристрою та дозволяє легко розмістити його на платі поруч із ESP32-C3 SuperMini.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		29

3.4.Обґрунтування оптичного датчика пульсоксиметрії

Ефективність, точність та завадостійкість комп'ютеризованої системи вимірювання SpO₂ і частоти пульсу безпосередньо залежать від метрологічних характеристик оптичного сенсора. У сучасній інженерній практиці для створення портативних пристроїв застосовують кілька типів фотоплетизмографічних датчиків.

Для обґрунтування вибору оптимального компонента було проведено порівняльний аналіз трьох найбільш поширених інтегральних рішень: аналогового датчика Pulse Sensor (серія KY-039), а також спеціалізованих цифрових чипів MAX30100 та MAX30102 від компанії Maxim Integrated.

Порівняльні характеристики цих сенсорів наведено у таблиці 3.3 [11].

Таблиця 3.3. Порівняльна характеристика оптичних сенсорів пульсоксиметрії

Критерій порівняння	Pulse Sensor (KY-039)	MAX30100	MAX30102	Критерій порівняння
Тип вихідного сигналу	Аналоговий (потребує АЦП мікроконтролера)	Цифровий (шина I2C)	Цифровий (шина I2C)	Тип вихідного сигналу
Вбудовані світлодіоди	Тільки зелений (або тільки червоний)	Червоний (660 нм) + Інфрачервоний (880 нм)	Червоний (660 нм) + Інфрачервоний (940 нм)	Вбудовані світлодіоди
Розрядність вбудованого АЦП	Відсутня	14 біт	18 біт (висока точність)	Розрядність вбудованого АЦП
Захист від зовнішнього світла	Відсутній (висока чутливість до завад)	Слабкий	Інтегроване оптичне скло (мінімізація завад)	Захист від зовнішнього світла
Функціональні можливості	Тільки частота пульсу	Пульс та сатурація (SpO ₂)	Пульс, сатурація (SpO ₂) + температурна компенсація	Функціональні можливості
Енергоспоживання (робоче)	Високе (≈20 мА)	Середнє	Низьке (підтримка програмованого струму та сну)	Енергоспоживання (робоче)

Детальний інженерний аналіз альтернативних варіантів дозволив виділити чіткі причини, чому датчики-конкуренти були відхилені, а вибір зупинено саме на MAX30102:

1. Чому відхилено Pulse Sensor (KY-039):

Цей датчик є повністю аналоговим. Він видає сирий сигнал, який дуже чутливий до електромагнітних наведень та зовнішнього освітлення. Оскільки він переважно обладнаний лише одним світлодіодом, він здатний вимірювати виключно частоту пульсу і фізично не може розрахувати відсотковий вміст кисню в крові (SpO2), що суперечить головному завданню технічного завдання.

2. Чому відхилено MAX30100 (попереднє покоління):

Попри те, що чип MAX30100 є цифровим і теж розраховує сатурацію, він має суттєві конструктивні недоліки. По-перше, його вбудований АЦП має розрядність всього 14 біт, що знижує точність при слабкому наповненні пульсу. По-друге, інфрачервоний світлодіод у ньому працює на довжині хвилі 880 нм, яка гірше поглинається оксигемоглобіном, ніж стандартна медична хвиля 940 нм. Крім того, перші ревізії плат MAX30100 мають відому апаратну проблему з лініями живлення шини I2C, що часто призводить до зависання мікроконтролера.

3. Переваги обраного сенсора MAX30102:

- Висока метрологічна точність: Завдяки вбудованому 18-бітному сигма-дельта АЦП чип здатний фіксувати навіть ультрамалі коливання об'єму артеріальної крові, що забезпечує низьку похибку вимірювання (в межах $\pm 2\%$).

- Професійний оптичний модуль: Сенсор містить у собі «правильну» пару світлодіодів (Червоний 660 нм та Інфрачервоний 940 нм), що відповідає стандартам професійного медичного обладнання та забезпечує максимальну лінійність вимірювальної кривої.

- Конструктивний захист: Кристал мікросхеми захищено спеціальним інтегрованим скляним покриттям, яке відсікає фонове ультрафіолетове та сонячне світло, мінімізуючи артефакти руху.

- Апаратне розвантаження процесора: Датчик має вбудовану буферну пам'ять FIFO (First-In-First-Out) на 32 комірки. Це дозволяє сенсору накопичувати виміряні точки самостійно, а мікроконтролеру ESP32-C3

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк. А
Зм.Зм.	Арк. А	№ докум. №	Підпис/Під	Дата		31

забирати їх пакетами. Це суттєво розвантажує обчислювальне ядро RISC-V і зменшує загальне енергоспоживання системи.

– Цифрова шина зв'язку: Передача оцифрованого сигналу по завадостійкій шині I2C повністю нівелює вплив довжини з'єднувальних дротів та паразитних ємностей плати на результат вимірювання.

Таким чином, інтегрована оптичний датчик MAX30102 є найбільш технологічним, точним та надійним рішенням для реалізації портативного пульсоксиметра у межах даного дипломного проекту.

3.5. Обґрунтування дисплея

Обґрунтування вибору та встановлення локального дисплея у структурі пристрою зумовлене потребою забезпечення повної автономності системи та організації інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу користувача. Оскільки розроблюваний пульсоксиметр позиціонується як портативний монітор індивідуального використання, інтеграція компактного графічного дисплея дозволяє пацієнту миттєво, у режимі реального часу, візуалізувати виміряні гемодинамічні параметри (відсотковий вміст кисню SpO2 та частоту пульсу) без обов'язкового підключення до персонального комп'ютера чи смартфона. Окрім числових значень, дисплей необхідний для відображення системної інформації: рівня заряду акумулятора, сервісних сповіщень у разі виникнення апаратних помилок.

Для інтеграції в архітектуру розроблюваної портативної системи вимірювання параметрів, до пристрою дисплею було висунуто ряд суворих критеріїв:

- Висока чіткість та яскравість;
- Мінімальне енергоспоживання;
- Масогабаритні показники;
- Надійність та довговічність;
- Ергономічні кути огляду.

					МММТ 480.017.017– ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		32

У сучасній приладобудівній практиці пристрої індикації класифікують за технологією формування зображення. Основними поширеними типами є: рідкокристалічні дисплеї з зовнішнім підсвічуванням (LCD), класичні світлодіодні матричні індикатори (LED), а також матриці на основі органічних світлодіодів (OLED). Завдяки відсутності потреби в окремому модулі заднього підсвічування, високій контрастності та енергоефективності при відображенні темних графічних інтерфейсів, технологія OLED є найбільш перспективною для реалізації поставлених завдань.

LCD (Liquid Crystal Display) – технологія дисплеїв, що використовує рідкі кристали, розташовані між двома скляними або пластиковими шарами. Рідкі кристали можуть змінювати свою оптичну властивість (прозорість або розсіювання світла), коли до них застосовується електричне поле. Це дозволяє керувати кожним пікселем на дисплеї. LCD-дисплеї часто потребують підсвічування для підсилення видимості зображення.

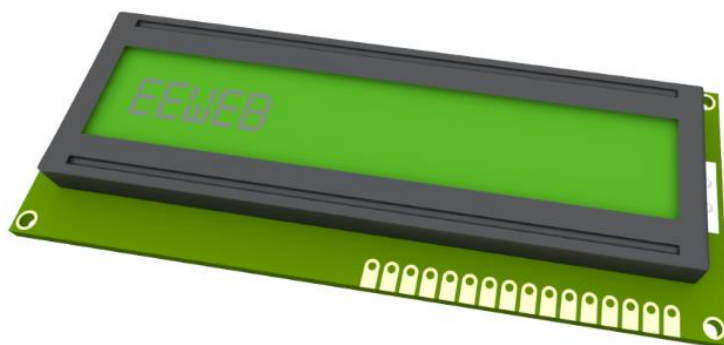


Рис.3.3. Зображення LCD дисплея

OLED (Organic Light Emitting Diode) – технологія дисплеїв, що використовує органічні матеріали, що світяться при проходженні електричного струму. Кожен піксель OLED – дисплею має свою власну світлодіодну лампу, яка може вмикатися і вимикатися окремо. Це дозволяє досягати високої контрастності та насиченості кольорів, а також широкого кута огляду. OLED – дисплеї не потребують підсвічування, що зменшує енергоспоживання та робить їх тоншими й легшими.



Рис.3.4. Зображення OLED дисплея

LED (Light Emitting Diode) – технологія, яка використовує світлодіоди для створення світла. LED-дисплеї часто використовуються як підсвітка для LCD-панелей, але також вони використовуються для створення великих екранів індикаторів. Вони відомі своєю високою яскравістю, довгим терміном служби і енергоефективністю.



Рис.3.5. Зображення вуличного LED дисплея

Для вибору оптимального типу дисплея було проведено порівняльний аналіз трьох основних технологій: рідкокристалічних дисплеїв (LCD), класичних світлодіодних індикаторів (LED) та матриць на органічних світлодіодах (OLED). Результати порівняння за ключовими критеріями проектування наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5. Порівняльний аналіз типів дисплеїв

Критерій порівняння	Рідкокристалічний (LCD)	Світлодіодний (LED/Матричний)	На органічних світлодіодах (OLED)
Принцип роботи	Рідкі кристали, що блокують світло від зовнішньої лампи підсвічування	Дискретні напівпровідникові світлодіоди	Самовипромінювальні органічні пікселі
Енергоспоживання	Постійно високе (через постійну роботу ламп підсвічування всієї матриці)	Середнє (залежить від кількості увімкнених сегментів)	Мінімальне (енергія споживається лише увімкненими пікселями; чорні пікселі струму не споживають)
Габарити та товщина	Товстий (через наявність шару підсвічування та світловодів)	Масивний, глибокий корпус	Ультратонкий та легкий (не потребує додаткових шарів)
Контрастність та чіткість	Середня (чорний колір виглядає сірим через фонове підсвічування)	Низька (розмиті символи великого розміру)	Максимальна (абсолютний чорний колір)
Кути огляду	Обмежені (при відхиленні спотворюються кольори та втрачається яскравість)	Середні	Максимальні (до 160°–170° без спотворення зображення)
Графічні можливості	Високі (відображення будь-якої графіки)	Дуже обмежені (лише цифри або прості символи)	Високі (ідеально для виведення тексту, іконок та графіків хвиль)
Критерій порівняння	Рідкокристалічний (LCD)	Світлодіодний (LED/Матричний)	На органічних світлодіодах (OLED)

Розглянувши та порівнявши з вимогами кожен вид дисплея дійшли до такого висновку, що для кращої роботи, зручності та енергозбереження краще взяти дисплей OLED зокрема, популярний модуль діагоналю 0.96 або 1.3 дюйма з роздільною здатністю 128 x64 точок [12].

Даний вибір є найбільш раціональним з огляду на такі інженерні переваги:

1.Критична енергоефективність: Оскільки наш пристрій є портативним і живиться від акумулятора, OLED-технологія є ідеальним рішенням. Графічний інтерфейс пульсоксиметра має темне тло, на якому підсвічуються

лише тонкі лінії пульсової хвилі та цифри сатурації й ЧСС. У такому режимі OLED-екран споживає у кілька разів менше струму, ніж LCD-екран, у якому лампа підсвічування змушена працювати на повну потужність незалежно від зображення.

2.Максимальна читаність та чіткість: Завдяки надвисокій контрастності органічних світлодіодів, медичні показники та дрібні графіки фотоплетизмограми відображаються чітко. Їх легко зчитувати людям із послабленим зором або в умовах яскравого сонячного освітлення.

3.Широкі кути огляду: Кути огляду в 160° дозволяють лікарю або пацієнту бачити стабільне зображення на екрані пристрою під будь-яким нахилом руки, що важливо під час оперативного медичного моніторингу.

4.Конструктивна компактність: Відсутність підсвічувальної матриці робить OLED-модуль надзвичайно тонким (до 2–3 мм). Разом із мікроконтролером ESP32-C3 SuperMini це дозволяє створити прилад з мінімально можливими габаритами.

3.6. Обґрунтування кнопки

Для забезпечення взаємодії користувача з комп'ютеризованою системою (ввімкнення пристрою, ініціалізація вимірювання) у схему необхідно інтегрувати надійний та компактний елемент ручного керування. Серед різноманіття комутаційних компонентів, таких як фіксовані тумблери, движкові перемикачі, сенсорні панелі та кнопкові модулі, для розроблюваного пульсоксиметра було обрано механічну тактову кнопку (Tactile Switch) типу мікроперемикача для монтажу на плату.

Даний вибір повністю обґрунтований комплексом її конструктивних та експлуатаційних переваг. Тактові кнопки мають чіткий тактильний відгук («клік»), який інформує пацієнта про фізичне замикання контактів, що вкрай важливо для літніх людей або пацієнтів із послабленими сенсорними можливостями. Оскільки мікроконтролер ESP32-C3 SuperMini підтримує

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		36

програмне розпізнавання тривалості утримання сигналу, використання всього однієї тактової кнопки без фіксації дозволяє реалізувати розширене керування: коротке натискання може перемикає орієнтацію екрана або графіки, а тривале утримання (понад 2 секунди) переводити систему в режим глибокого енергозбереження (Deep Sleep).

З інженерного погляду, обрана кнопка відрізняється ультрамалими габаритами (зазвичай 6х6 мм при висоті всього кілька міліметрів) та надзвичайно простою схемою підключення. Вона комутується безпосередньо між цифровим входом (GPIO) мікроконтролера та шиною заземлення (GND). Використання внутрішнього підтягувального резистора (Pull-up) процесора RISC-V дозволяє повністю відмовитися від зовнішньої апаратної обв'язки на друкованій платі. Високий комутаційний ресурс тактових кнопок (від 100 000 до 1 000 000 натискань) гарантує довговічність та стабільну роботу всього портативного приладу в умовах щоденної експлуатації, а ефект «брязкоту контактів» (bounce effect), притаманний усім механічним перемикачам, ефективно усувається програмним способом шляхом введення невеликої затримки в коді мікроконтролера.

3.7.Обґрунтування акумулятора

Для забезпечення портативності та повної автономності комп'ютеризованої системи вимірювання було прийнято рішення про використання змінних гальванічних елементів (сухих батарейок), як первинного джерела живлення. Таке рішення дозволяє відмовитися від складних апаратних вузлів контролерів заряду літєвих акумуляторів, спрощує загальну топологію друкованої плати, знижує кінцеву вартість приладу та забезпечує можливість миттєвого відновлення працездатності системи шляхом простої заміни елементів живлення користувачем.

Обґрунтування вольтажу та конфігурації батарей: Для забезпечення стабільної роботи системи було обрано конфігурацію із двох послідовно

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						37
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

з'єднаних лужних (Alkaline) батарейок типорозміру AAA (або AA) з сумарною номінальною напругою 3,0 В (або трьох елементів із сумарною напругою 4,5 В).



Рис.3.6. Звичайні батарейки AAA

Вибір параметрів батарейного блока обґрунтований такими інженерними факторами:

- Усунення вузла контролера заряду: Оскільки гальванічні елементи є одноразовими і не підлягають повторному заряджанню, з принципової схеми пристрою повністю виключається мікросхема контролера заряду (наприклад, типу TP4056) та супутня захисна обв'язка. Інтегрований на платі ESP32-C3 SuperMini порт USB Type-C у такій конфігурації використовується виключно як інформаційний інтерфейс для прошивки мікроконтролера, відладки програмного коду на ЕОМ або для дротової передачі даних.

- Роль лінійного стабілізатора напруги (LDO): Незважаючи на відсутність зарядного пристрою, стабілізатор напруги в системі залишається обов'язковим. У процесі розряду батарейок їхня сумарна напруга неминуче падає (наприклад, від 3,2 В до 2,4 В для двох елементів). Оптичний сенсор MAX30102 та вбудований 18-бітний АЦП вкрай чутливі до коливань живлення. Для забезпечення метрологічної точності вимірювань, напруга з батарейного відсіку подається на вбудований в плату розробки лінійний

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		38

стабілізатор з малим падінням напруги (LDO), який вирівнює її до фіксованих 3,3 В (або ефективно підтримує працездатність цифрової логіки на максимально можливому рівні до критичного розряду елементів).

– Експлуатаційна практичність: Батарейки типу AAA мають компактні розміри, низьку ціну та є загальнодоступними, що є суттєвою перевагою для користувача медичного приладу самоконтролю.

Живлення всіх компонентів:

– MAX30102: 1.8 В для основного живлення (VDD), 3.3 В для світлодіодів (VDIO);

– ESP32: 3.3 В;

– Дисплей: 3.3 В;

– Кнопка: 3.3 -5 В;

– Світлодіод: 3,3 В;

– Динамік : 3,3 В.

Після огляду всіх компонентів живлення обираємо 3 батарейки по 1,5В (сумарно 4,5В).

3.7. Побудова структурної схеми

Структурна схема є основним конструкторським документом, який у вигляді графічного зображення визначає головні функціональні блоки системи, їхнє цільове призначення та взаємозв'язки між ними. Вона відображає загальну архітектуру пристрою і послідовність взаємодії апаратних модулів, що є загальноприйнятим стандартом проектування в таких галузях техніки, як електроніка, обчислювальна техніка, автоматизація та телекомунікації.

На основі детального аналізу та обґрунтування вибору компонентної бази для розроблюваної комп'ютеризованої системи вимірювання рівня кисню у крові та частоти пульсу було сформовано її повну апаратну архітектуру.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						39
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

З урахуванням інтеграції мікроконтролера лінійки ESP32, цифрового оптичного перетворювача, автономного живлення та елементів світлозвукового і візуального сповіщення було розроблено структурну схему пристрою, яка наведена на рис. 3.7.



Рис.3.7. Структурна схема

Перелік складових комп'ютеризованої системи згідно з структурною схемою:

- Мікроконтролер (центральне обчислювальне та керуюче ядро)
- Оптичний датчик пульсоксиметрії (первинний вимірювальний перетворювач)
- Кнопка (елемент ручного керування)
- Акумулятор (батарейний блок)
- Дисплей (пристрій візуального відображення інформації)
- Червоний світлодіод (елемент світлової сигналізації)
- Динамік (елемент звукової сигналізації)

4. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

4.1. Вибір мікроконтролера

Плата розробника ESP32-C3 SuperMini (рис.4.1) – це плата з одноядерним мікроконтролером ESP32-C3FH4 (32Bit RISC-V). Цей мікроконтролер має бездротову мережу WiFi (2.4 ГГц, 802.11b/g/n, 802.11mc (150 Mbit) і Bluetooth 5 (LE). Головним плюсом цієї плати є її мініатюрний розмір всього 23 мм x 18 мм і низьке енергоспоживання (в режимі глибокого сну 5mA). Плата оснащена керамічною антеною. На платі розташовані кнопки Boot та Reset.



Рис.4.1. Зовнішній вигляд ESP32-C3 SuperMini

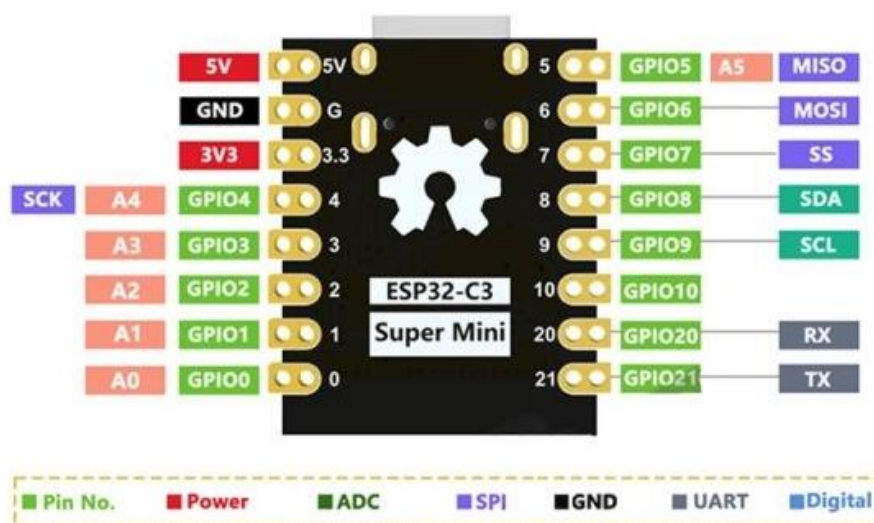


Рис.4.2. Розпіновка мікроконтролера ESP32-C3 SuperMini

Особливості ESP32-C3 SuperMini:

- Потужний процесор: 32-бітний RISC-V CPU з підтримкою високоточних обчислень.
- Висока продуктивність: Робоча частота до 160 MHz забезпечує швидкий відгук.
- Гнучкість підключення: Підтримка WiFi та Bluetooth для різних варіантів бездротового підключення.
- Низьке енергоспоживання: Ідеально підходить для енергоефективних програм.
- Малі розміри дозволяють використовувати модуль у пристроях і невеликих проектах.

Технічні характеристики:

- Процесор: ESP32-C3, 32-бітний RISC-V однопроцесорний чіп з робочою частотою до 160 MHz.
- WiFi: Підтримка 802.11b/g/n (2.4GHz), режими Station, SoftAP та SoftAP+Station.
- Енергоспоживання: Глибокий сон – близько 5mA.
- Пам'ять: 400KB SRAM, 384KB ROM, вбудована 4MB Flash пам'ять.
- Розміри: компактні габарити (22.5мм x 18мм), підходять для пристроїв, що носяться, і невеликих проектів.
- Широкі можливості: Підтримка AES-128/256, RSA, HMAC, цифровий підпис та безпечний запуск.
- Інтерфейси: 1xI2C, 1xSPI, 2xUART, 11xGPIO (PWM), 4xADC [13].

4.2.Вибір світлової та звукової сигналізації

Для світлової сигналізації оберемо червоний світлодіод FYL-5013SRD рис.4.3. FYL-5013SRD – це класичний вивідний світлодіод круглої форми діаметром 5 мм від відомого виробника Foryard Optoelectronics.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		42



Рис.4.3. Червоний світлодіод FYL-5013SRD

Технічні характеристики:

- Виробник: FORYARD;
- Діаметр: 5 мм;
- Колір світіння: Червоний;
- Робоча напруга: 2.2 В;
- Струм: 30 мА;
- Кут свічення: 60°;
- Сила світла: 80 мкд;
- Довжина хвилі: 660 нм;
- Робоча температура: -40...60°C[14].

В якості динаміка обрано пасивний п'єзоелектричний зумер (динамік HCM1203A рис.4.4).



Рис.4.4. Динамік HCM1203A

Технічні характеристики:

- Тип випромінювача: Електромагнітний, без генератора
- Номінальна напруга: 3 В;
- Робоча напруга 3 В;

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		43

- Струм споживання: 70 мА;
- Робоча частота: 2,4 кГц;
- Потужність випромінювання: 85 дБ;
- Розмір: 12.0x12.0x9.0 мм [15].

4.3. Вибір оптичного датчика пульсоксиметрії

В даній роботі було обрано датчик MAX30102 за такими критеріями: компактність, висока точність, низька енергозатратність, простий інтерфейс, низька ціна та доступність.

Датчик серцевого ритму MAX30102 є високоточним датчиком, який використовується для вимірювання пульсу і рівня насичення крові киснем (SpO₂). Він інтегрує два світлодіоди (червоний і інфрачервоний), фотодетектор, оптичні елементи і електронні компоненти в один компактний модуль.

Як первинний вимірювальний перетворювач гемодинамічних показників у системі застосовано високоінтегрований біометричний сенсорний модуль MAX30102. Даний компонент є спеціалізованою мікросхемою, що суміщає в собі функції оптичного пульсоксиметра та монітора частоти серцевих скорочень (ЧСС). Сенсор відрізняється низьким рівнем енергоспоживання, що є критично важливим для портативних пристроїв з батарейним живленням, а обмін даними з центральним мікроконтролером здійснюється за допомогою стандартного послідовного інтерфейсу I2C. [16]



Рис.4.5. Датчик MAX30102

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	Підпис/Під	Дата		44

З одного боку MAX30102 має два світлодіоди – червоний та інфрачервоний світлодіод. З іншого боку знаходиться дуже чутливий фотодетектор. Його ідея полягає в тому, що ви запалюєте один світлодіод за раз, визначаючи кількість світла, що повертається на детектор, і на основі ви можете вимірювати рівень кисню в крові та частоту серцевих скорочень.

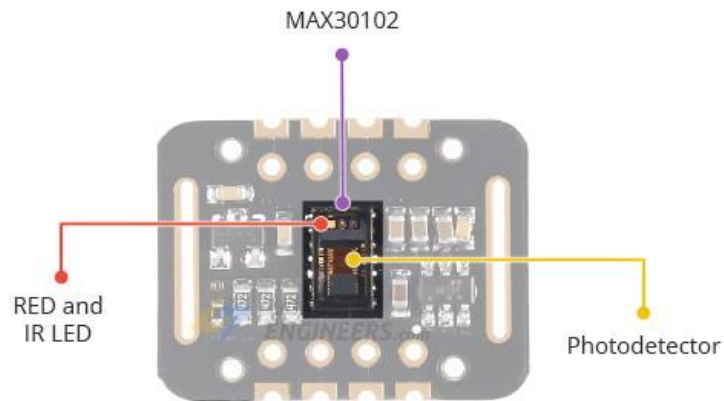


Рис.4.6. Схема датчика пульсу та рівня кисню в крові на основі модуля MAX30102

Для функціонування внутрішніх вузлів інтегральної мікросхеми MAX30102 необхідна наявність двох різних номіналів напруги живлення: 1,8 В для забезпечення роботи цифрового ядра та внутрішньої аналогової логіки, а також 3,3 В для безпосереднього живлення інтегрованих оптичних випромінювачів (червоного та інфрачервоного світлодіодів). З метою спрощення інтеграції датчика, на платі сенсорного модуля вже розведені власні мініатюрні лінійні стабілізатори напруги на 1,8 В та 3,3 В.

Конструктивною особливістю друкованої плати модуля є наявність конфігураційної паяної перемички, яка дозволяє гнучко обирати рівень напруги логічних сигналів інтерфейсу (1,8В або 3,3В). За замовчуванням у модулі встановлено логічний рівень 3,3 В, що забезпечує його повну апаратну сумісність із сучасними мікроконтролерами, зокрема з обраною архітектурою ESP32-C3, без використання додаткових зовнішніх перетворювачів рівнів (конвертерів логіки).

Технічні характеристики датчика MAX30102:

– Напруга живлення цифрового ядра (VDD): від 1,7 В до 2,0 В (номінальне значення 1,8 В);

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	Підпис/Під	Дата		45

- Напруга живлення вбудованих світлодіодів (VLED): від 3,1 В до 5,25 В (номінальне значення 3,3 В);
- Струм споживання в активному режимі вимірювання: не більше 600 мкА (при стандартній частоті опитування 100 Гц);
- Струм споживання в режимі глибокого сну (Standby Mode): всього 0,7 мкА;
- Довжина хвилі червоного світлодіода (λ_{RED}): 660 нм (оптимізована для детекції відновленого гемоглобіну Hb);
- Довжина хвилі інфрачервоного світлодіода (λ_{IR}): 880 нм (оптимізована для детекції оксигемоглобіну HbO₂);
- Діапазон програмного регулювання струму світлодіодів: від 0 мА до 50 мА з кроком налаштування через 8-бітні регістри;
- Ширина імпульсу випромінювання світлодіодів (LED Pulse Width): регульована, від 50 мкс до 400 мкс;
- Роздільна здатність інтегрованого АЦП: налаштовувана, від 15 біт до 18 біт (залежно від обраної ширини імпульсу випромінювання);
- Частота дискретизації сигналу (Sample Rate): програмована в діапазоні від 50 Гц до 3200 Гц;
- Інтерфейс зв'язку з мікроконтролером: послідовна двопровідна шина I²C (Fast Mode) з підтримкою тактової частоти до 400 кГц;
- Апаратна адреса на шині I2C: фіксована 7-бітна адреса 0x57 (пакети 0xAE для запису та 0xAF для читання даних);
- Об'єм апаратного буфера пам'яті (FIFO): 32 зразки (забезпечує тимчасове зберігання даних для розвантаження центрального процесора);
- Діапазон вимірювання вбудованого термодатчика кристала: від -40°C до +85°C з точністю калібрування 1° C;
- Температурний діапазон експлуатації мікросхеми: від -40°C до +85°C;
- Тип та габарити корпусу: мініатюрний безвивідний корпус типу OLGA (14 контактів), розміри — 5,6 x 3,3 x 1,55 мм.

Блок схема MAX30102 представлена на рис.4.7.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	Підпис/Під	Дата		46

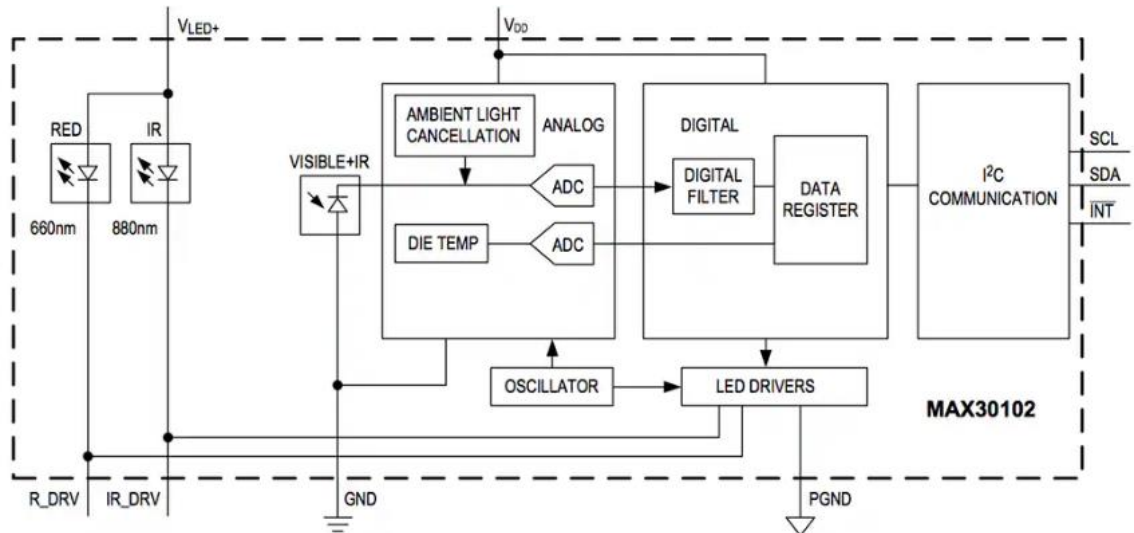


Рис.4.7. Блок схема MAX30102

Модуль MAX30102 має наступні підключення рис.4.8.

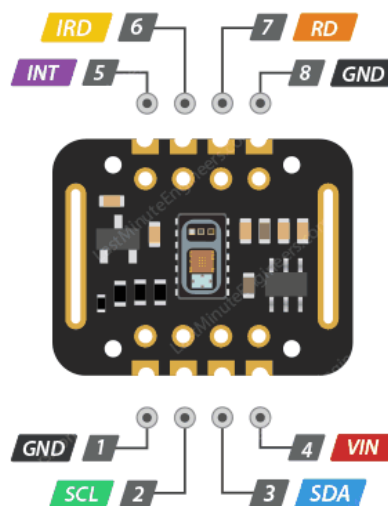


Рис.4.8. Підключення до модуля датчика MAX30102

- VIN – це вивід живлення. Його можна увімкнути до 3.3В або 5В виходу з мікроконтролера;
- SCL – це I2C пін, підключений до I2C лінії мікроконтролера;
- SDA – це I2C контактний пін даних, підключений до I2C лінії даних мікроконтролера;
- INT MAX30102 може бути запрограмований для створення переривання для кожного імпульсу.

-IRD MAX30102 вбудований світлодіодний драйвер для керування світлодіодними імпульсами для вимірювання SpO2 та ЧСС.

-Вивід RD схожий на вивід IRD, але використовується для керування червоним світлодіодом;

-GND - земля.[16]

4.4.Вибір дисплея

SSD1306 — це контролер для OLED дисплеїв, які зазвичай використовуються для виведення інформації в електронних проєктах. Він підтримує дисплеї з різною роздільною здатністю, наприклад, 128x64 або 128x32.[17]

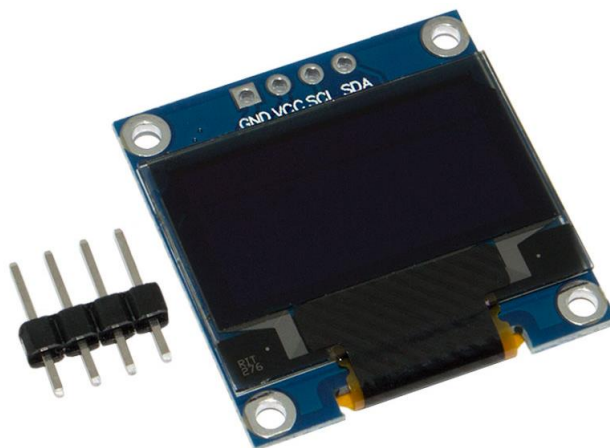


Рис.4.9. Зовнішній вигляд SSD1306

Технічні характеристики SSD1306:

- Діагональ: 0,96";
- Роздільна здатність дисплея: 128x64;
- Кут огляду: 160°;
- Колір свічення: синій/жовтий;
- Ультранизькое споживання: при зображенні на весь екран приблизно 0,04 Вт;
- Інтерфейс: I2C;
- Робоча температура: -30...70°C;

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		48

- Напруга живлення: 3...5 В;
- Драйвер: SSD1306;
- Сумісний із середовищем Arduino, MSP430, STM32 Розміри: 27х27х4, 1 мм [17].

Табл.4.1. Підключення модуля до мікроконтролера

Контакти модуля	Контакти мікроконтролера
GND	GND
VCC	3.3В
SCL	A5
SDA	A4

Графічний дисплей на базі драйвера SSD1306 функціонує за технологією органічних світлодіодів (OLED). Принцип його роботи базується на самовипромінюванні світла кожним окремим пікселем під дією електричного струму. Це дозволяє повністю вимикати невикористовувані пікселі для відображення глибокого чорного кольору, що забезпечує надвисоку контрастність зображення та суттєво знижує загальне енергоспоживання модуля.

4.5.Вибір кнопки

Кнопка встановлена безпосередньо в розрив дроту від батарейного відсіку і працює як головний вимикач живлення (Power Switch). Вона призначена для повного увімкнення та вимкнення пристрою, що дозволяє повністю знеструмити схему та зберегти заряд батарейок, коли прилад не використовується.

Кнопка – це комутаційний електромеханічний елемент, призначений для замикання або розмикання електричного кола шляхом механічного натискання на його рухому частину.

Конструктивно пристрій складається з діелектричного корпусу та штовхача, що взаємодіє з контактною групою, яка залежно від призначення може мати нормально розімкнену (NO) або нормально замкнену (NC) конфігурацію.

Кнопка тактова ТАСТ 6х6 – 4.3 мм 4PIN є одним з типів мікроперемикачів, призначених для електронних пристроїв і плат розробника.



Рис.4.10. Зовнішній вигляд кнопки

Технічні характеристики кнопки:

- Максимальний робочий струм: 50 мА;
- Максимальна робоча напруга: 12 В постійного струму (DC);
- Опір контактів (закритих): $\leq 0,03$ Ом (30 мОм);
- Опір ізоляції (відкритих контактів): ≥ 100 МОм (при напрузі 250 В DC);
- Діелектрична міцність: витримує до 250 В змінного струму (AC) протягом 1 хвилини;
- Розміри корпусу (основи): 6х6 мм;
- Повна висота (разом із натискним штовхачем): 4.3 мм;
- Кількість виводів (контактів): 4 PIN;
- Зусилля натискання: близько 130–160 гс (грам-сил);
- Хід кнопки: $0,25 \pm 0,1$ мм;
- Ресурс (кількість натискань): не менше 100 000 циклів;
- Робочий діапазон температур: від -25°C до $+70^{\circ}\text{C}$;

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		50

– Тип контактів: нормально розімкнені (SPST-NO – Single Pole Single Throw, Normally Open). Пари ніжок замикаються лише тоді, коли кнопка утримується натиснутою [18].

4.6. Вибір акумулятора

Для забезпечення повної автономності та мобільності розроблюваної системи вимірювання рівня кисню у крові та частоти пульсу було обрано живлення від змінних гальванічних елементів. З урахуванням енергоспоживання мікроконтролера ESP32-C3 SuperMini та периферійних модулів (дисплея, датчика, засобів сигналізації), оптимально є використання трьох лужних (Alkaline) батарейок типу AAA, з'єднаних послідовно.

Як конкретний базовий елемент автономного живлення у проекті обрано лужні батарейки Duracell Ultra AAA (міжнародний стандарт LR03). Дані елементи живлення мають високу питому ємність (1150 мАг) та оптимізовані для пристроїв із періодичним імпульсним споживанням струму (активація дисплея, робота оптичних світлодіодів датчика MAX30102 та вбудованого Bluetooth-передавача мікроконтролера).



Рис.4.11. Батерейки Duracell Ultra AAA

Використання батарейок серії Ultra мінімізує падіння напруги під навантаженням завдяки низькому внутрішньому опору. Крім того, наявність міцного сталевого корпусу із захистом від протікання забезпечує високу

надійність приладу та унеможливило пошкодження друкованої плати агресивним електролітом під час тривалої експлуатації пацієнтом.

Технічні характеристики Duracell Ultra AAA:

- Тип електрохімічної системи: Лужна (Alkaline-Manganese Dioxide, MnO_2);
- Міжнародне маркування за IEC: LR03 (тип AAA, або «мізинчикова»);
- Номінальна напруга одного елемента: 1,5 В (для 3 шт. – 4,5 В);
- Номінальна ємність: 1150 мАг (при розряді струмом до 25–50 мА);
- Внутрішній опір (імпеданс): близько 120 мОм (забезпечує стабільну напругу без різких просідань під час пікових навантажень);
- Маса одного елемента: 11,5 г;
- Діапазон робочих температур: від -20°C до $+54^{\circ}\text{C}$;
- Термін зберігання (саморозряд): до 10 років завдяки технології Duralock [19].

4.7. Принципова схема

Принципова схема – це графічне або текстове представлення електричної (або іншої технічної) системи, яке показує її компоненти і взаємозв'язки між ними. Вона відображає основні елементи та їх зв'язки, необхідні для функціонування системи, без детального відображення фізичних розмірів, форм і розташування цих елементів. Принципові схеми використовуються в різних галузях техніки для проектування, аналізу та обслуговування складних систем.

На базі обраних елементів та структурної схеми побудуємо принципову схему системи рис.4.12.

					МММТ 480.017.017– ПЗ	Арк.А
						52
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	Підпис/Під	Дата		

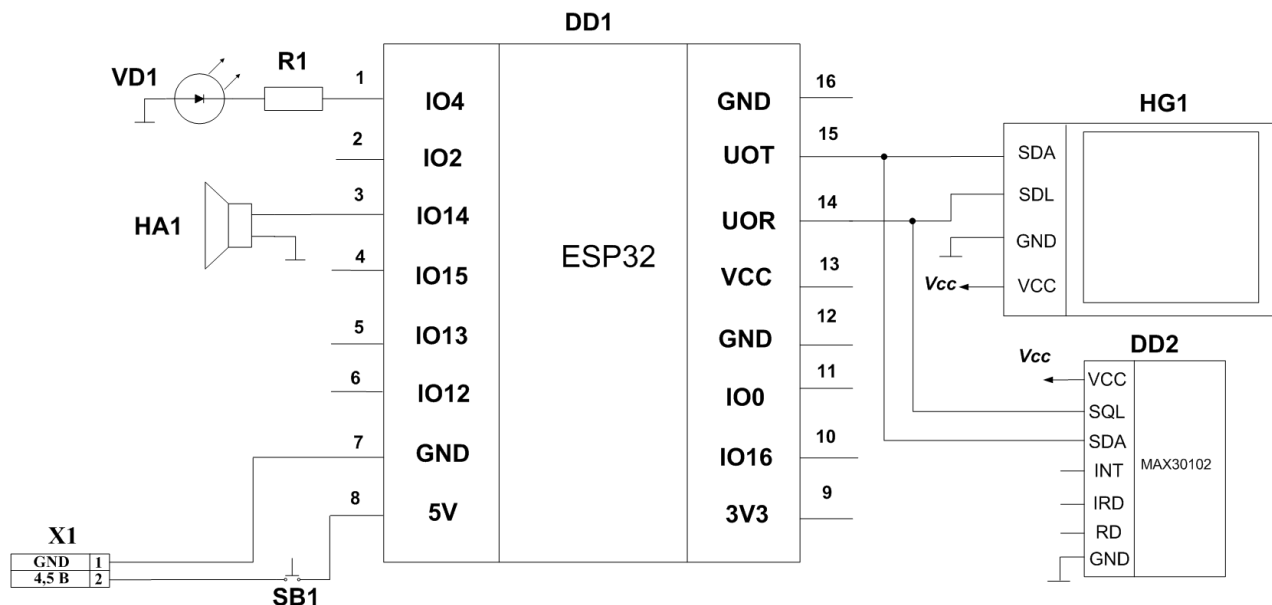


Рис.4.12. Принципова схема системи

Складові елементи системи наступні:

- DD1 – мікроконтролер ESP32-C3 SuperMini;
- R1 – 220 Ом;
- DD2 – датчик серцевого ритму MAX30102;
- HG1 – OLED-дисплей SSD1306;
- HA1 – динамік HCM1203A;
- SB1 – кнопка тактова ТАСТ 6X6 - 4.3 MM 4PIN;
- VD1 – світлодіод червоний FYL-5013SRD;
- X1 – роз’єм для акумулятора (3 батарейки по 1,5 В).

5. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ТА АЛГОРИТМУ

5.1. Розробка алгоритму

Розроблений алгоритм забезпечує автоматизований процес збору біометричних даних, їх математичну обробку, візуальну та звукову індикацію станів, а також контроль енергоспоживання системи. Зображення алгоритму представлено на рис.5.1.

1. Ініціалізація та початкова затримка

Початок: Алгоритм починає виконуватися в момент натискання на кнопку живлення SB1, яка замикає коло живлення 4,5В від батарейного відсіку X1 на вхід регулятора напруги мікроконтролера DD1.

Ініціалізація: На цьому етапі відбувається первинне налаштування периферійних портів введення/виведення (IO4 для світлодіода, IO14 для зумера), конфігурація апаратної шини I2C (U0T, U0R) для зв'язку з OLED-дисплеєм HG1 та датчиком DD2 (MAX30102), а також очищення буфера екрана.

Затримка ($t = 15$ сек): Після успішної ініціалізації система витримує паузу тривалістю 15 секунд для стабілізації перехідних процесів у живленні, виходу оптичних сенсорів на робочий режим та підготовки користувача до процедури вимірювання.

2. Запит та очікування пацієнта

На екран виводиться текстове повідомлення-запрошення «Покладіть палець».

Система запускає програмний таймер очікування тривалістю 10 секунд. Протягом цього часу мікроконтролер безперервно опитує фотодетектора датчика MAX30102.

Умова перевірки «Палець є?»: Якщо протягом 10 секунд фіксується стійкий інфрачервоний сигнал відбиття від тканин пальця (перехід за гілкою «так»), алгоритм переходить до фази зчитування.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		54

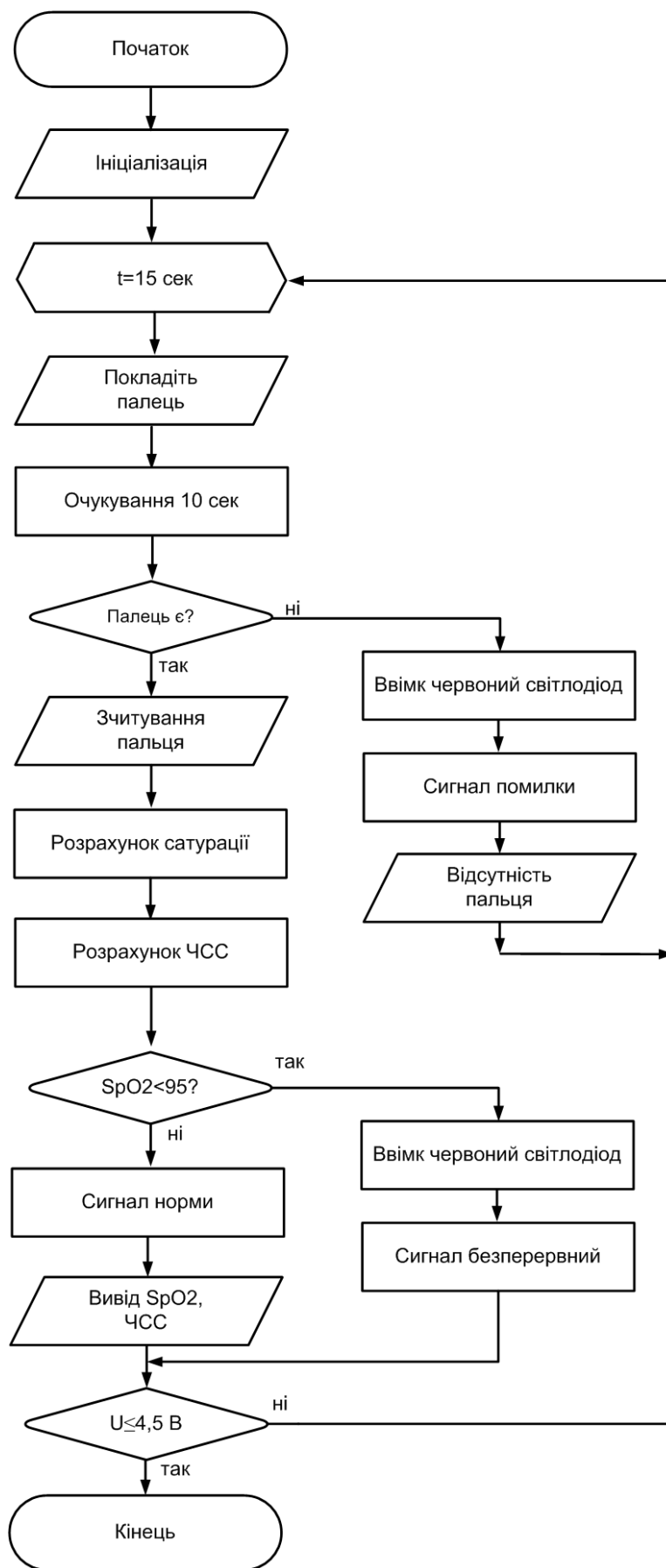


Рис.5.1 Блок-схема алгоритму

Якщо за 10 секунд палець не виявлено (перехід за гілкою «ні»), активується режим сповіщення про помилку: вмикається червоний аварійний світлодіод VD1, зумер HA1 подає характерний акустичний сигнал помилки, а на дисплей виводиться повідомлення «Відсутність пальця». Після цього алгоритм повертається на початок циклу очікування (до блоку затримки $t=15$ сек).

3. Зчитування та обробка біометричних сигналів

Зчитування пальця: Після детекції пальця мікроконтролер починає високошвидкісне зчитування масивів даних з фотодіода датчика за двома оптичними каналами: червоного світла (визначення дезоксигемоглобіну Hb) та інфрачервоного світла (визначення оксигемоглобіну HbO₂).

Розрахунок сатурації (SpO₂): Обчислювальне ядро реалізує алгоритм фільтрації постійної складової сигналу, визначає амплітуди змінних складових для обох довжин хвиль і за їхнім співвідношенням розраховує відсотковий вміст кисню в артеріальній крові.

Розрахунок ЧСС: Програма аналізує часові інтервали між пульсовими піками інфрачервоного сигналу і перераховує їх у частоту серцевих скорочень (ударів за хвилину).

4. Аналіз результатів та індикація стану

Після завершення обчислень алгоритм виконує логічну перевірку отриманого рівня сатурації на відповідність медичній нормі: «SpO₂ < 95?».

Гілка «ні» (Показники в нормі): Формується звуковий «Синал норми» (короткий тональний писк зумера HA1). На OLED-дисплей виводяться фінальні числові результати: «Вивід SpO₂, ЧСС» для ознайомлення пацієнта.

Гілка «так» (Критичний стан – Гіпоксія): Негайно вмикається червоний світлодіод VD1 («Ввімк червоний світлодіод»).

Зумер HA1 переходить у режим безперервної генерації частоти («Сигнал безперервний»), що виконує роль тривожної сигналізації про небезпечне зниження кисню.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		56

5. Контроль живлення та завершення роботи

Наприкінці робочого циклу алгоритм виконує специфічну перевірку стану напруги: « $U \leq 4,5V$ ».

Важлива інженерна ремарка для записки: Оскільки у апаратній схемі кнопка SB1 стоїть безпосередньо в розриві дроту батарейного відсіку, ця логічна умова відображає фізичний стан кнопки:

Гілка «ні» (Кнопка утримується натиснутою): Напруга присутня на платі, тому алгоритм зациклюється і знову повертається в режим очікування ($t=15$ сек) для можливого повторного вимірювання.

Гілка «так» (Кнопку відпущено): Користувач відпускає кнопку SB1, напруга падає до нуля $U = 0V$, що задовольняє умову $4,5 \leq V$, схема фізично знеструмлюється, і алгоритм досягає логічного блоку «Кінець». Це забезпечує нульове споживання енергії батарейок у вимкненому стані.

5.2. Розробка програми

У попередніх розділах було детально обґрунтовано, обрано та проаналізовано апаратні компоненти, що складають основу розроблюваної системи вимірювання. Для забезпечення взаємодії між мікроконтролером, датчиками та засобами індикації було розроблено відповідне програмне забезпечення.

Розробка та відлагодження керуючої програми здійснювалися в інтегрованому середовищі Arduino IDE (Integrated Development Environment). Цей інструментарій дозволяє проектувати, компілювати та завантажувати мікропрограми в архітектуру мікроконтролера ESP32-C3 за допомогою структурованого візуального інтерфейсу. Безпосереднє написання програмного коду реалізовано на високорівневих мовах програмування C/C++ із використанням спеціалізованих апаратних бібліотек для шини I2C.

Для програмування ESP32-C3 за допомогою Arduino IDE, на початку обираємо плату esp32 рис.5.2.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						57
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

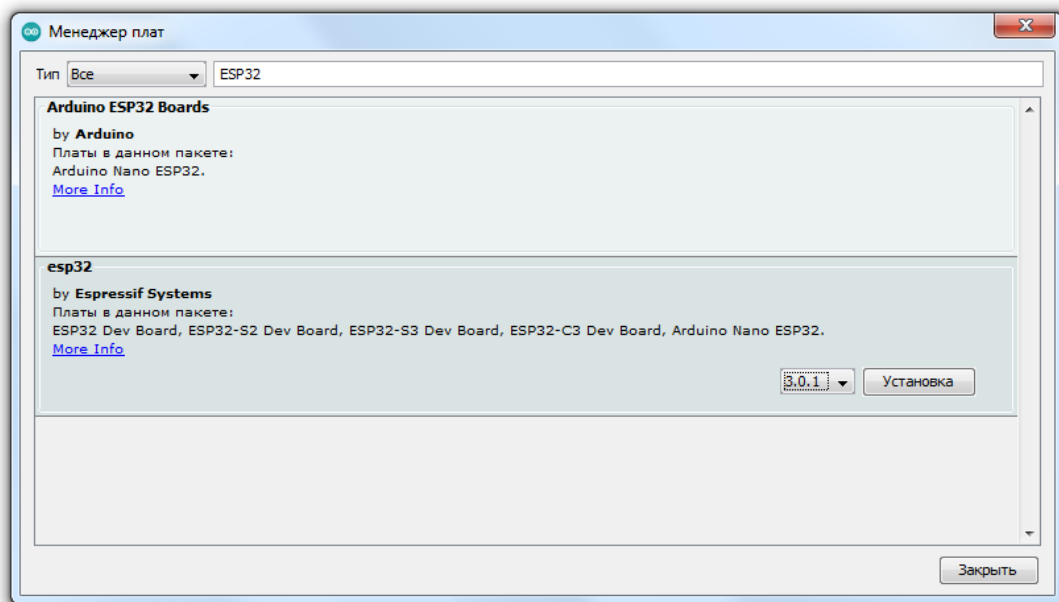


Рис.5.2. Вибір плата ESP32-C3

Далі додаємо необхідні бібліотеки в Arduino, а саме MAX30102_PulseOximeter.h, а для дисплея Adafruit_SSD1306.h й Adafruit_GFX.h..

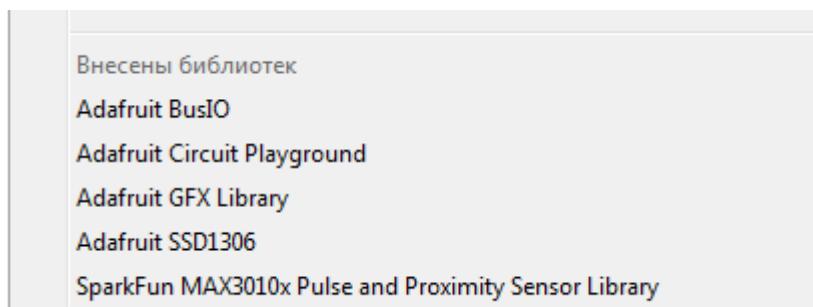


Рис.5.3. Вибір необхідних бібліотек

Після встановлення всіх потрібних бібліотек та вибору мікроконтролеру можна починати писати код, детальний код представлено в додатку А.

Нижче розглянемо основні блоки програми.

Підключення до пінів

```
// --- Піни ---
const int LED_PIN = 4;          // цифровий вихід на світлодіод тривоги VD1
const int BUZZER_PIN = 14;      // цифровий вихід на п'єзоелектричний зумер HA1
// Дисплей SSD1306 та датчик MAX30102 підключені до апаратних пінів шини I2C:
// SDA -> IO15 (U0T)
// SCL -> IO14 (U0R)
```

Змінні, константи

```
// --- НАЛАШТУВАННЯ ТАЙМЕРА ОЧІКУВАННЯ ---
unsigned long previousMillis = 0; // час останнього оновлення лічильника
const long interval = 1000;       // інтервал тривалістю в 1 секунду (1000 мс)
```

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		58

```

int countdownCounter = 10;           // стартове значення відліку для виявлення
пальця (10 с)

// --- БІОМЕТРИЧНІ ДАНІ ТА БУФЕРИ ---
uint32_t irBuffer[100];             // буфер для сирих даних інфрачервоного
каналу
uint32_t redBuffer[100];             // буфер для сирих даних червоного каналу
bool fingerDetected = false;         // прапорець наявності пальця на датчику
int32_t spo2 = 98;                   // розраховане значення кисню в крові (%)
int32_t heartRate = 75;              // розраховане значення частоти пульсу (уд/хв)

```

Налаштування на вхід та вихід пінів

```

pinMode(LED_PIN, OUTPUT);           // червоний світлодіод тривоги як вихід
pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);        // звуковий зумер як вихід
// Примітка: Піни I2C для дисплея та датчика ініціалізуються автоматично
відповідними бібліотеками

```

Ініціалізація дисплея та модуля

```

// --- ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ ДИСПЛЕЯ ТА СЕНСОРА ---

Adafruit_SSD1306 display(128, 64, &Wire, -1); // об'єкт OLED-дисплея
MAX30105 particleSensor;                     // об'єкт датчика MAX30102

// Код у setup():
display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);   // запуск OLED за I2C адресою 0x3C
display.clearDisplay();                       // очищення пам'яті екрана
display.setTextSize(1);                      // розмір шрифту
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);         // колір тексту
display.setCursor(0, 0);
display.println("System Init...");
display.display();
delay(1000);                                 // стартова пауза

particleSensor.begin(Wire, I2C_SPEED_FAST);   // запуск датчика на швидкій шині I2C
particleSensor.setup();                       // конфігурація режимів роботи
сенсора

```

Код для виводу на дисплей

```

// --- ВИВІД РЕЗУЛЬТАТІВ НА ДИСПЛЕЙ ---

display.clearDisplay();

display.setTextSize(2); // збільшений шрифт для зручності пацієнта
display.setCursor(0, 5);
display.print("SpO2: ");
display.print(spo2);     // виведення сатурації
display.println("%");
display.setCursor(0, 35);
display.print("HR: ");
display.print(heartRate); // виведення пульсу
display.println(" bpm");
display.display();

```

Основний цикл програми

```

void loop() {
    // --- 1. ЗАПРОШЕННЯ КОРИСТУВАЧА ---
    display.clearDisplay();

```

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						59
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

```

display.println("Place your finger");
display.display();
// --- 2. ПЕРЕВІРКА НАЯВНОСТІ ПАЛЬЦЯ ТА ТАЙМАУТ 10 СЕКУНД ---
countdownCounter = 10;
while (countdownCounter > 0) {
    long irValue = particleSensor.getIR(); // зчитуємо ІЧ-сигнал
    if (irValue > 50000) { // якщо палець на датчику
        fingerDetected = true;
        break; // переходимо до вимірювання
    }
    // Логіка відліку 10 секунд через мілісекунди...
}
// --- 3. ОБРОБКА ВІДСУТНОСТІ ПАЛЬЦЯ ---
if (!fingerDetected && countdownCounter == 0) {
    display.println("No finger found!");
    digitalWrite(LED_PIN, HIGH); // увімкнути світлодіод помилки
    tone(BUZZER_PIN, 500, 300); // звуковий сигнал помилки
    return; // повернення на початок циклу
}
// --- 4. ЗЧИТУВАННЯ БІОМЕТРИЧНИХ ДАНИХ ---
if (fingerDetected) {
    display.println("Measuring...");
    for (int i = 0; i < 100; i++) {
        redBuffer[i] = particleSensor.getRed(); // накопичуємо червоний канал
        irBuffer[i] = particleSensor.getIR(); // накопичуємо ІЧ-канал
    }
    // --- 5. МАТЕМАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК САТУРАЦІЇ ТА ПУЛЬСУ ---

    int32_t spo2; // Змінна, куди алгоритм запише реальну сатурацію
    int8_t validSPO2; // Прапорець: 1 – розрахунок SpO2 надійний, 0 – помилка
    вимірювання
    int32_t heartRate; // Змінна, куди алгоритм запише реальну частоту пульсу
    int8_t validHeartRate; // Прапорець: 1 – розрахунок ЧСС надійний, 0 – помилка
    вимірювання

    // Виклик функції математичного аналізу масивів (алгоритм обробки 100 зразків)
    maxim_heart_rate_and_oxygen_saturation(
        irBuffer, // Масив даних інфрачервоного каналу (100 точок)
        100, // Розмір масиву даних
        redBuffer, // Масив даних червоного каналу (100 точок)
        &spo2, // Передаємо адресу змінної для запису результату SpO2
        &validSPO2, // Передаємо адресу для запису прапорця валідності SpO2
        &heartRate, // Передаємо адресу для запису результату ЧСС
        &validHeartRate // Передаємо адресу для запису прапорця валідності ЧСС
    );

    // --- 6. ПЕРЕВІРКА НА КРИТИЧНИЙ СТАН (МЕДИЧНА ТРИВОГА) ---
    if (spo2 < 95) {
        digitalWrite(LED_PIN, HIGH); // увімкнути тривожне світло (гіпоксія)
        tone(BUZZER_PIN, 1000); // безперервна сирена
    } else {
        tone(BUZZER_PIN, 2000, 200); // короткий сигнал норми
    }
    // --- 7. РЕЖИМ ОЧІКУВАННЯ ТА ДЕАКТИВАЦІЯ СИСТЕМИ ---
    // Виведення результатів на екран та очікування вимкнення пристрою
    // Оскільки SB1 стоїть на лінії живлення, для вимкнення користувач просто
    відпускає кнопку
    delay(15000);
    noTone(BUZZER_PIN);
    digitalWrite(LED_PIN, LOW);
}
}

```

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						60
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

6.КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

6.1.Розробка друкованої плати

Друкована плата (PCB) – це конструктивна основа у вигляді діелектричної пластини, на поверхні та/або всередині якої сформовано електропровідні доріжки (провідники) та контактні майданчики. Вона призначена для механічного кріплення та електричного з'єднання між собою різних електронних компонентів (мікроконтролерів, резисторів, датчиків, роз'ємів тощо) відповідно до принципової електричної схеми пристрою.

Для розробки топології друкованої плати пристрою було використано сучасне хмарне САПР-середовище EasyEDA. Даний програмний комплекс є спеціалізованим інструментом для наскрізного проєктування електронних засобів, що інтегрує в собі редактор принципів електричних схем, менеджер посадкових місць компонентів (Footprints) та модуль безпосереднього трасування плат.

До переваг обраного середовища автоматизованого проєктування належать:

- наявність розширеної уніфікованої бази даних електронних компонентів з інтегрованими посадковими місцями стандарту IPC;
- можливість оперативного пошуку та адаптації відкритих інженерних рішень і референтних дизайнів;
- вбудовані інструменти автоматичного та ручного трасування з контролем дотримання технологічних зазорів;
- функція тривимірного (2D/3D) моделювання розробленого пристрою, що дозволяє візуально оцінити щільність компонування та верифікувати габаритні параметри виробу перед відправкою у виробництво.

Результати проєктування топології та тривимірна модель розробленого модуля наведені на рисунках 6.1–6.3.

Конструктивно розроблена друкована плата виконана двошаровою, де як базовий діелектрик застосовано фольгований склотекстоліт марки FR-4.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						61
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Електричний зв'язок між провідними мідними доріжками протилежних сторін плати реалізовано за допомогою міжшарових перехідних отворів (Vias), виконаних методом хіміко-гальванічної металізації. Двошарова топологія дозволила оптимально розвести сигнальні лінії цифрової шини I2C та високострумкові лінії живлення, а також мінімізувати паразитні наведення.

Габаритні розміри спроектованої друкованої плати становлять 44 x 70 мм, що забезпечує високий ступінь компактності та ергономічності портативного пульсоксиметра.

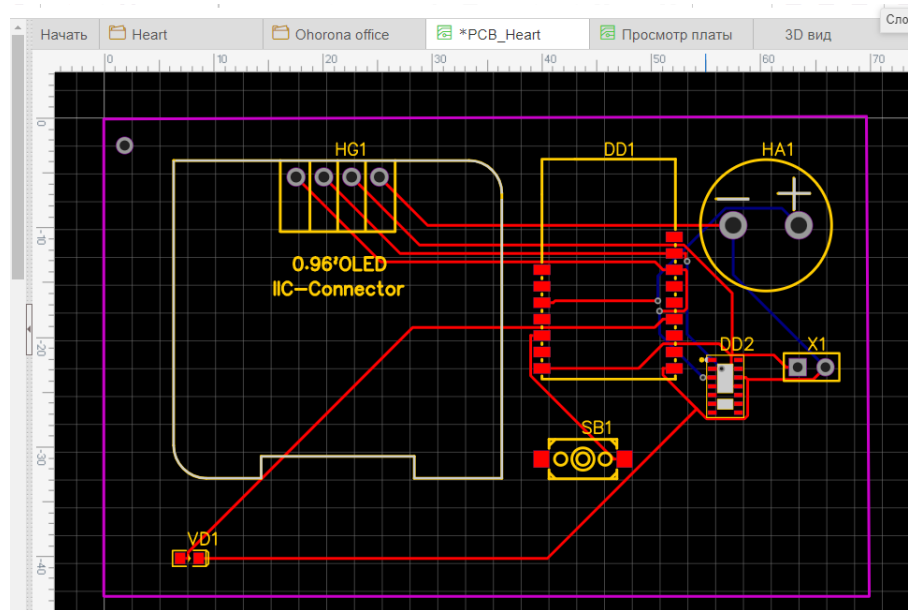


Рис.6.1. Друкована плата

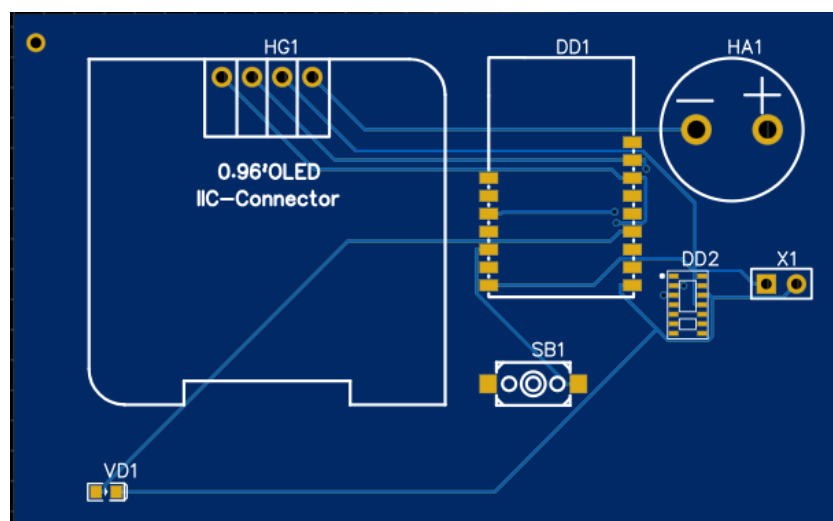


Рис.6.2. Верхній шар друкованої плати



Рис.6.3. Нижній шар друкованої плати

Габаритні розміри захисного корпусу пристрою становлять 54x80x 30мм, що обумовлено необхідністю розміщення друкованої плати (44x70мм) з урахуванням двоміліметрової товщини стінок пластику, технологічних зазорів для стійок кріплення та виступу робочої поверхні датчика MAX30102. Задана висота корпусу в 30мм є мінімально технічно можливою, оскільки вона визначається сумарною товщиною ложементу для трьох батарейок типу ААА (14 мм), висотою компонентів на платі разом із OLED-дисплеєм (12 мм) та внутрішніми конструктивними зазорами. Таке компонування дозволяє створити максимально компактний, ергономічний та мобільний медичний прилад, який зручно утримувати однією рукою під час експрес-діагностики.

6.2.Розрахунок похибки

Було проведено десять вимірювань рівня кисню в крові пульсоксиметром з датчиком MAX30102. Діапазон вимірювання SpO2 згідно з технічними характеристиками становить від 0 до 100%.

Було отримано наступну вибірку виміряних даних $SpO_2 = (97.2, 96.6, 97.0, 97.4, 96.9, 97.1, 96.7, 97.3, 97.0, 96.8)$, детально представлено в таблиці 6.1.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						63
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Таблиця 6.1. Виміряні значення сатурації пацієнта

№ відліку	Реальний час (хв:с)	Показник сатурації, SpO2 (%)
1	11:00	97,2
2	11:20	96,6
3	11:40	97,0
4	12:00	97,4
5	12:20	96,9
6	12:40	97,1
7	13:00	96,7
8	13:20	97,3
9	13:40	97,0
10	14:00	96,8

За відомими формулами шукаємо:

1) середнє арифметичне SpO2 (6.1):

$$\overline{SpO2} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} SpO2_i \approx 97,00 \quad (6.1)$$

2) похибки повторних вимірювань $\Delta SpO2$ та $(\Delta SpO2)^2$ (6.2)

$$\Delta SpO2 = |\overline{SpO2} - SpO2_i| \text{ та } \Delta SpO2_i^2 = (\overline{SpO2} - SpO2_i)^2 \quad (6.2)$$

де $i = 1, 2 \dots 10$;

Табл.6.2.Результати та обчислення

№ відліку	SpO2 (%)	$\Delta SpO2$ (%)	$(\Delta SpO2)^2$
1	97,2	-0,20	0,0400
2	96,6	0,40	0,1600
3	97,0	0,00	0,0000
4	97,4	-0,40	0,1600
5	96,9	0,10	0,0100
6	97,1	-0,10	0,0100
7	96,7	0,30	0,0900
8	97,3	-0,30	0,0900
9	97,0	0,00	0,0000
10	96,8	0,20	0,0400
Середнє	97,00	—	0,0640

Розрахуємо випадкову похибку вимірювання за (6.1). За даними табл. 6.1 знайдемо коефіцієнт Стюдента для 10 вимірювань і довірчої ймовірності 0,95

$t_{0,95}=2,26$; розрахуємо за (6.2) виправлене вибіркове середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{1}{9} \sum_{i=1}^{10} (\overline{SpO_2} - SpO_i)^2} \approx 0,266\%;$$

та знайдемо випадкову похибку:

$$\Delta SpO_{2_{вин}} = t_{0,95} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 2,26 \cdot \frac{0,266}{\sqrt{10}} = 2,26 \cdot 0,084 \approx 0,19\%$$

Результати вимірювань та обчислень виносимо у табл. 6.2.

1) похибку вимірювання за (6.3):

$$\Delta_{пр} SpO_2 = \frac{1}{300} t_p k T_{гр} \quad (6.3)$$

Для надійної ймовірності $P = 0,95$ з табл. 6.2 знайдемо при умові $t_{0,95}=2,0$. Враховуючи, що за умовою $T_{гр} = 100\%$, а клас точності $k = 1$, отримаємо:

$$\Delta_{пр} SpO_2 = \frac{1}{300} 2 \times 100 \times 1 \approx 0,6\%;$$

2) похибку заокруглення за (6.4)

$$\Delta SpO_{2_3} = P \frac{h}{2}. \quad (6.4)$$

Для цього знайдемо інтервал заокруглення h як половину останнього розряду вимірюваної величини — 0,05. Отже:

$$\Delta SpO_{2_3} = 0,95 * \frac{0,05}{2} \approx 0,02 \%;$$

3) загальну абсолютну похибку (6.5):

$$\Delta SpO_2 = \sqrt{(\Delta_B SpO_2)^2 + (\Delta_{пр} SpO_2)^2 + (\Delta_3 SpO_2)^2} = \sqrt{0,19^2 + 0,6^2 + 0,02^2} \approx 0,63\% \quad (6.5)$$

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						65
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Записуємо кінцевий результат:

$$S = (97,0 \pm 0,63) \%$$

Таким чином, середнє значення SpO_2 становить 97%, а загальна абсолютна похибка становить приблизно 0.63%.

6.3.Розрахунок надійності

Надійність є комплексною властивістю вимірювального пристрою, яка визначає його здатність безвідмовно виконувати задані функції та зберігати експлуатаційні параметри у встановлених межах протягом заданого інтервалу часу. Забезпечення високого рівня надійності є критично важливим етапом на стадіях проєктування, схемотехнічного моделювання та практичної експлуатації засобів медичного призначення.

При розрахунку надійності визначалися наступні кількісні показники:

- Імовірність безвідмовної роботи за заданий час $P(t)$;
- Параметр потоку відмовлень $\lambda(t)$;
- Середній наробіток до відмовлення T_e .

Властивість приладу безперервно зберігати працездатний стан під час експлуатації характеризується його безвідмовністю. Математично вона виражається через імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ на визначених часових інтервалах, які для електронних засобів зазвичай приймаються рівними 500, 1000 або 2000 годин.

Головним розрахунковим параметром при аналізі надійності є інтенсивність відмов $\lambda(t)$, що визначає щільність імовірності виникнення відмови елемента в даний момент часу за умови його справності до початку розглянутого інтервалу.

Прогнозований розрахунок показників надійності виконано за методикою $\lambda(t)$ характеристик. В основу даного методу покладено використання середньостатистичних (базових) інтенсивностей відмов комплектуючих виробів (КВ) та інтегральних мікросхем (ІС) із введенням

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		66

поправочних коефіцієнтів, які враховують реальні електричні режими, теплові навантаження та специфіку умов експлуатації пристрою.

Виріб призначений для роботи в умовах помірного клімату:

-робочий діапазон температури від -25 до 55°C , відносна вологість повітря до 80% при 20°C ;

-конструктивне виконання: стійке до вібраційних навантажень, без застосування систем штучного регулювання мікроклімату (природне охолодження).

Апаратно пристрій являє собою автоматизовану систему контролю та вимірювання частоти пульсу і рівня сатурації киснем капілярної крові. Критерієм відмови пульсоксиметра є вихід із ладу будь-якого з його функціональних вузлів або окремого електронного компонента, що призводить до повної втрати працездатності або виходу похибки вимірювання за встановлені метрологічні межі, унеможливаючи подальше використання приладу за прямим призначенням.

При виконанні теоретичного розрахунку надійності було прийнято такі інженерні допущення:

1.Відмови окремих комплектуючих виробів та інтегральних схем є випадковими, статистично незалежними та взаємно виключними подіями.

2.Елементи пристрою з'єднані за послідовною логіко-структурною схемою надійності, тобто відмова будь-якого компонента призводить до відмови всього пульсоксиметра в цілому.

3.Інтенсивність відмов усіх комплектуючих елементів у межах періоду нормальної експлуатації є постійною величиною $\lambda(t)=\text{const}$.

4.Розподіл часу безвідмовної роботи пристрою підпорядковується експоненціальному закону.

Розрахунок надійності розробленого медичного виробу проведено на основі специфікації принципової електричної схеми з урахуванням визначеної кліматичної категорії та конструктивних особливостей корпусу приладу.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		67

Розрахунок параметра потоку відмовлень виробу проводиться по формулі:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n N_i \lambda_i \quad (6.6)$$

де:

-n – загальне число групи КВ, що входять до складу проєктованого виробу;

- $N_i \lambda_i$ – кількість і інтенсивність відмовлень КВ *i*-ої групи відповідно.

Інтенсивність відмовлень КВ *i*-ої групи в робочому режимі визначалася по формулі:

$$\lambda_i = \lambda_{oi} a_i \dots a_n \quad (6.7)$$

де:

– λ_{oi} - інтенсивність відмовлень КВ в номінальному режимі і нормальних умовах;

– $a_i \dots a_n$ - поправкові коефіцієнти, що враховують умови роботи.

Конкретні формули, по яких визначалися інтенсивність відмовлень кожної групи комплектувальних виробів, приведені в таблиці 6.2.

По формулі (6.6) визначаємо потік відмовлень виробу дані беремо з 10 графі в табл.6.3:

$$\lambda = 68,2 \times 10^{-6} \text{ 1/год.}$$

Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу *t* визначалася по формулі

$$P(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t \quad (6.8)$$

– λ – параметр потоку відмовлень;

–*t* – час роботи виробу (год) .

Дані розрахунку *P(t)* приведені в таблиці 6.3.

Табл.6.2. Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу *t*

250	500	750	1000	2000	5000	8000	10000
0,9831	0,9664	0,9501	0,9341	0,8724	0,7109	0,5793	0,5054

Табл.6.3. Перелік комплектуючих виробів

Поз.	Найменування	Кіл.	$\lambda_{i0} \cdot 10^6$ год ⁻¹	Формула розрахунку λ_i	Коефіцієнти				$\Sigma \lambda_i \cdot 10^6$ год ⁻¹
1	Мікросхеми				a_1	a_2	a_4	a_6	
	ESP32	1	0,3	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6$	2,1	1	1,3	1	0,819
2	Датчики				a_1	a_2	a_4	a_6	
	MAX10302	1	0,3	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6$	2,1	1	1,3	1	0,819
3	Червоний LED	1	0,3	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6$	2,1	1	1,3	1	0,819
4	Резистор 220 Ом	1	0,008	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4$	2,1	0,8		1	0,01344
5	Дисплей OLED 1306	1	0,3	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6$	2,1	1	1,3	1	0,819
6	Кнопка	1	0,2	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4$	2,1		0,7	1	0,294
7	Бuzzer	1	0,3	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4$	2,1	1	1,3	1	0,819
8	Акумулятор 5 В	1	30	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_4$	2,1			1	63
9	Пайки	62	0,0001	$\lambda_0 \cdot a_1$	2,1				0,0189
	Разом								68,2

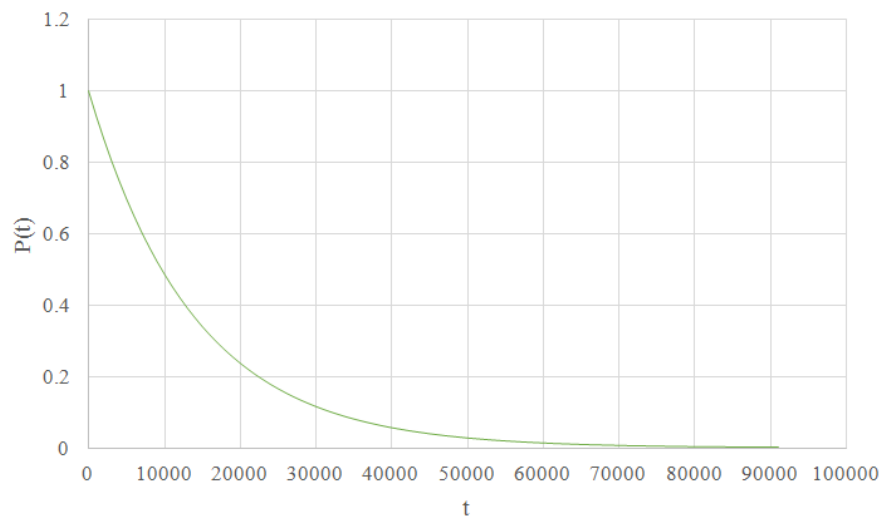


Рис.6.4 Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу t
Середній наробіток до відмовлення виробу визначався по формулі:

$$T_0 = \lambda^{-1} \quad (6.9)$$

Виконуємо розрахунки згідно з формулою (6.9) отримуємо:

$$T = (68,2 \cdot 10^{-6})^{-1} = 14\,662 \text{ годин.}$$

7.ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

7.1.Охорона праці

Охорона праці – це комплексна система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, які спрямовані на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі її професійної діяльності.

Безпека життєдіяльності є науково-практичною дисципліною, що досліджує умови комфортного та безпечного існування людини в природному, техногенному та соціально-виробничому середовищах, а також визначає заходи захисту працюючих від потенційного впливу небезпечних і шкідливих чинників.

Етап лабораторного виготовлення, макетування, паяння та метрологічного налаштування автоматизованих систем контролю сатурації крові та пульсу є відповідальним процесом, який супроводжується взаємодією з радіоелектронною апаратурою, паяльним обладнанням, обчислювальною технікою та хімічними речовинами. Це вимагає суворого дотримання високих стандартів безпеки та інженерної екології.

У даному розділі пояснювальної записки наведено аналіз та обґрунтування технічних рішень щодо забезпечення безпечних умов праці під час роботи з розробленим макетом пульсоксиметра. Усі організаційно-технічні заходи засновані на чинних нормативно-правових актів та державних стандартів України (НПАОП, ДСТУ), які регламентують впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів на працівника [20].

7.2. Законодавчі акти з охорони праці

Організація безпечних умов праці під час проектування, виготовлення та тестування розробленого пульсоксиметра базується на чинному законодавстві

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						70
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

України, що встановлює правові засади у сфері захисту життя та здоров'я працюючих.

Основними законодавчими актами, якими регулюється охорона праці у даній роботі, є:

1.Конституція України. Є головним правовим фундаментом, стаття 43 якого зазначає, що кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці.

2.Кодекс законів про працю (КЗпП) України. Регулює трудові відносини всіх працівників, визначає тривалість робочого часу, встановлює обов'язкові перерви для відпочинку та регламентує особливості праці жінок і молоді у виробничих умовах.

3.Закон України «Про охорону праці». Окреслює основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на захист їхнього життя і здоров'я у процесі трудової діяльності. Закон визначає дію єдиної системи організації охорони праці в Україні та встановлює сувору відповідальність за порушення нормативних вимог.

4.Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення». Регламентує обов'язкові гігієнічні вимоги до організації робочих місць, рівнів освітлення, шуму, вібрації, а також стану повітряного середовища у приміщеннях, де здійснюється збирання та налаштування радіоелектронної апаратури.

5.Кодекс цивільного захисту України. Встановлює правові основи у сфері цивільного захисту, захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій, а також визначає вимоги до забезпечення пожежної та техногенної безпеки на об'єктах господарювання.

Всі практичні інженерно-технічні заходи, розраховані у наступних підрозділах (електробезпека, вентиляція, штучне освітлення робочої зони дослідника), детально скориговані та відповідають вимогам відповідних НПАОП (Нормативно-правових актів з охорони праці) та чинних державних стандартів України (ДСТУ) [20].

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		71

7.3.Безпека життєдіяльності на підприємстві

Лабораторно-виробничі підрозділи або спеціалізовані підприємства, на базі яких здійснюється виготовлення, фінішне збирання, програмування та метрологічна атестація автоматизованих систем контролю сатурації крові, зобов'язані забезпечити неухильне дотримання чинних законодавчих і нормативно-технічних актів.

З метою мінімізації ризиків та створення безпечних умов праці під час роботи з розробленим пристроєм, комплекс організаційних заходів включає.

Атестацію та раціональну організацію робочих місць. Обов'язкова оцінка відповідності умов праці (рівня електромагнітного випромінювання, параметрів мікроклімату, освітленості регульовальних стендів) вимогам діючих санітарно-гігієнічних норм.

Забезпечення засобами індивідуального захисту (ЗІЗ). Видача розробникам та монтажникам відповідного спецодягу (антистатичних халатів), захисних окулярів для роботи з паяльним обладнанням, а також засобів захисту органів дихання від аерозолів припоїв та продуктів згоряння флюсів.

Організацію системи навчання та інструктажів. Проведення обов'язкового навчання з безпечних методів роботи з радіоелектронною апаратурою. Сюди входить своєчасна реєстрація в журналах з охорони праці первинного (на робочому місці), повторного, позапланового (при зміні технологічного процесу чи заміні вимірювальних приладів) та цільового інструктажів.

Проведення періодичних медичних оглядів. Організація регулярного медичного контролю стану здоров'я персоналу, задіяного на ділянках макетування та паяння плат, які пов'язані з впливом шкідливих виробничих чинників (токсичні випаровування, напруження зорового аналізатора).

Технічний нагляд та метрологічне обслуговування обладнання. Забезпечення планово-попереджувального ремонту, регулярного контролю ізоляції паяльних станцій, заземлення лабораторних стендів та калібрування

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		72

зразкових іоніметрів і генераторів сигналів для запобігання аварійним ситуаціям.

Моніторинг та профілактику виробничого травматизму. Створення системи обліку, аналізу та оперативного розслідування будь-яких випадків порушення вимог безпеки з негайним впровадженням технічних засобів захисту для їх повного унеможливлення в майбутньому.

Комплексне впровадження та підтримання розглянутих організаційних заходів є базовою умовою збереження здоров'я дослідників, а також гарантією стабільності та метрологічної надійності процесу налаштування медичної вимірювальної техніки.

7.4.Безпека життєдіяльності в домашніх умовах

Етап дослідження, апаратної реалізації та налагодження макета автоматизованої системи контролю сатурації крові в умовах домашньої лабораторії вимагає організації комплексу заходів для мінімізації ризиків травмування, ураження електричним струмом та хімічного отруєння продуктами паяння.

Робоче місце облаштовується на діелектричній, рівній і стійкій поверхні. Площа столу повинна забезпечувати вільне розміщення вимірювальних приладів, ПК та паяльної станції. Рівень комбінованого освітлення має відповідати вимогам роботи з дрібними SMD-компонентами для зниження напруження зорового аналізатора. Через виділення токсичних аерозолів та парів аліфатичних сполук під час термодеструкції каніфолі та флюсів, приміщення обов'язково обладнується локальною витяжною вентиляцією (димвідводом) або забезпечується безперервне наскрізне провітрювання. Підключення обладнання виконується виключно через справні розетки із заземлюючим контактом, не допускаючи перевантаження побутової електромережі.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						73
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Для захисту органів зору від бризок розплавленого припою та механічних частинок під час обрізання виводів компонентів обов'язковим є використання захисних окулярів. Опіки від контакту з нагрітими елементами запобігаються застосуванням термостійкого інструменту. Захист органів дихання від дрібнодисперсних аерозолів свинцю та олова забезпечується використанням протипилових масок або респіраторів. Для захисту чутливих напівпровідникових структур мікроконтролера та оптичного сенсора від статичної електрики, робоче місце комплектується заземленим антистатичним килимком та браслетом.

Безпека при роботі з монтажним обладнанням та тестуванні. Технологічний процес монтажу передбачає виконання таких правил:

- паяльна станція повинна мати цифрове регулювання температури і встановлюватися виключно на вогнетривку підставку;
- забороняється залишати увімкнені термічні прилади без нагляду;
- перед першим поданням напруги на макет плати проводиться візуальний та інструментальний контроль відсутності коротких замикань у колах живлення;
- усі монтажні та ремонтні роботи (паяння, заміна компонентів, перепідключення виводів датчика) здійснюються строго за умови повного знеструмлення схеми.

Під час безпосереднього тестування вимірювального каналу контролюється тепловий режим роботи мікросхем для запобігання їх перегріву та термічного руйнування. Після завершення робочого циклу проводиться повне відключення стенда від мережі живлення, прибирання робочої зони від гострих залишків провідників та очищення поверхонь від хімічних речовин. Організоване зберігання інструментів та компонентів у спеціальних кейсах дозволяє підтримувати належний рівень безпеки та працездатності домашнього дослідницького середовища.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
						74
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра було розроблено комп'ютеризовану систему вимірювання рівня насичення крові киснем та частоти пульсу.

За результатами виконання роботи зроблено такі основні висновки:

1. Проведено розгорнутий аналітичний огляд сучасних методів та технічних засобів вимірювання сатурації та частоти пульсу. На основі порівняльного аналізу існуючих аналогів обґрунтовано доцільність створення портативного пульсоксиметра з підвищеною стабільністю вимірювального тракту.

2. Розроблено структурну та принципову електричну схеми системи. Ядром пристрою обрано високопродуктивний мікроконтролер ESP32-C3 SuperMini із вбудованими бездротовими інтерфейсами, а як первинний перетворювач – оптичний сенсор MAX30102.

3. Спроековано топологію двошарової друкованої плати у програмному середовищі EasyEDA. Розроблена друкована плата розміром 44x70мм.

4. Створено блок-схему алгоритму та програмне забезпечення у середовищі розробки Arduino IDE.

5. Виконано комплексний метрологічний аналіз та розрахунок надійності розробленого пристрою. За результатами експериментальних досліджень та статистичної обробки вибірки вимірювань сатурації ($SpO_2=97\%$) визначено, що загальна абсолютна похибка системи становить 0,63%, а, що підтверджує високу точність та конкурентоспроможність розробленого вимірювального каналу.

6. Опрацьовано та впроваджено комплекс організаційно-технічних заходів з охорони праці, виробничої санітарії, електро- та пожежної безпеки. Обґрунтовано правила безпеки життєдіяльності під час макетування, паяння та тестування пристрою як у виробничих, так і в домашніх лабораторних умовах.

					МММТ 480.017.017- ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		75

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. What is Pulse Oximetry? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cablesandsensors.com/pages/what-is-pulse-oximetry-the-definitive-guide-for-monitoring-oxygen-saturation-levels>.
2. Сатурація кисню: все, що треба знати про важливий показник [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://glavred.net/health/saturaciya-kisloroda-fakty-o-vazhnom-pokazatele-10228130.html>.
- 3.Пульсоксиметр Неасо CMS60D [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://medhome.in.ua/p1914652193-pulsoksimetr-heaco-cms60d.html>.
- 4.Пульсоксиметр ZUG MEDICAL WIT-S300 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.med1.com.ua/product-page-zug-medical-wit-s300>.
5. Contec Pulse Oximeter CMS50D [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://techno-med.com.ua/ua/pulsoksimetr-contec-pulse-oximeter-cms50d.html>
- 6.Viatom PO6.[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://synthetic.ua/product/pulsoksimetr-viatom-po6-sinii/P1012TBC/CS02509254>.
7. Мікропроцесори та мікроконтролери: навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», освітньої програми «Мікро- та наноелектроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Д. Д. Татарчук, Ю. В. Діденко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 238с.
8. Мікроконтролер ESP32 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://itmaster.biz.ua/directory/microcontrollers/esp32.html>.
9. Світлодіод [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bitkit.com.ua/svetodiod>.
10. Світлодіодний Індикатор (LED), Що Випромінює Світло При Електричному Зарядженні, Що Виробляє Електролюмінесценцію [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ua.panasyslcd.com/info/light-emitting-diode-led-emitting-light-whe-20148980.html>.

11. Цифрові чипи MAX30100 та MAX30102. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://myproject.com.ua/max30100-max30100-datchik-pulsu-ta-sercevegogo-ritmu-ua.html>.

12. Що таке дисплей [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.leddisplayfactory.com/uk/blog/what-is-a-led-display-what-is-a-digital-led-display>.

13. ESP32-C3 SuperMini [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ardushop.in.ua/arduino/esp32-c3-supermini-esp32-development-board-wi-fi-bluetooth>.

14. Червоний світлодіод FYL-5013SRD [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kosmodrom.ua/ru/svetodiod-vyvodnoy/fyl-5013srd.html>.

15. Динамік HCM1203A [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.kosmodrom.com.ua/el.php?name=HCM1203A>.

16. Maxim Integrated MAX30102 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kosmodrom.ua/ru/otladochnaya-plata/max30102-modul.html>.

17. OLED дисплей 0.96" SSD1306 I2C 128X64 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pointers.net.ua/p2767697690-modul-displeya-ssd1306.html>.

18. Кнопка тактова tact 6x6 4.3 мм 4pin [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://electronica.in.ua/ua/p1534468036-knopka-taktovaya-tact.html>.

19. Duracell Ultra AAA4pin [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://evse.com.ua/ru/batarejka-aaa-lr3-duracell-ultra-schelochnaya-15v>.

20. Закон України "Про охорону праці" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>.

21. Охорона праці в галузі / П. С. Атаманчук, В. В. Мендерецький, О. П. Панчук, Р. М. Білик., 2019. – 322 с.