

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

Програмно-апаратний комплекс для оцінки

функціональних резервів серцево-судинної системи

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи РБ-41

спеціальності 163 Біомедична інженерія

	(шифр і назва спеціальності)	
		Безух М.А.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник		Яворська Є.Б.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Хвостівський М.О.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри		Яворська Є.Б.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент		Хвостівська Л.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Біотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Яворська Є.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 163 Біомедична інженерія
(шифр і назва спеціальності)

студенту Безух Мар'яні Анатоліївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Програмно-апаратний комплекс для оцінки
функціональних резервів серцево-судинної системи

Керівник роботи Яворська Є.Б., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «23» 01 2025 року № 4/7-43

2. Термін подання студентом завершеної роботи

3. Вихідні дані до роботи Функціональні показники ССС (норма, патологія),
технічні характеристики комплексу

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

РОЗДІЛ 3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

[illegible]

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Безух М.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Яворська Є.Б.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Програмно-апаратний комплекс для оцінки функціональних резервів серцево-судинної системи». Кваліфікаційна робота бакалавра // Безух Мар'яна Анатоліївна // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, група РБ-41 // Тернопіль, 2025 р // стор. –49, рис. – 10, табл. – 7, бібліог. – 16, додат. – 1.

Ключові слова: СЕРЦЕВО-СУДИННА СИСТЕМА, ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ РЕЗЕРВ, ФОТОПЛЕТИЗМОГРАМА, ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ СЕРЦЕВОГО РИТМУ, ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС, MATLAB, ESP32

У роботі розроблено програмно-апаратний комплекс для неінвазивної оцінки функціональних резервів серцево-судинної системи людини. Запропоноване рішення поєднує мікроконтролер ESP32, сенсори фотоплетизмограми (MAX30102) та шкірно-гальванічної реакції (GSR), а також обчислювальні алгоритми у середовищі MATLAB для обробки біосигналів, розрахунку індексу Руф'є, показників варіабельності серцевого ритму (SDNN, RMSSD) та темпу відновлення. Система пройшла тестування на групі добровольців, що підтвердило її ефективність для застосування у спортивній, клінічній та реабілітаційній практиці.

ABSTRACT

The subject of the qualification work: "Hardware and software complex for assessing the functional reserves of the cardiovascular system" Bachelor's qualification work // Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Group RB-41 // Ternopil, 2025 // pp. – 49, fig. – 10, tab. - 7, bibliog. - 16, add. – 1.

Keywords: CARDIOVASCULAR SYSTEM, FUNCTIONAL RESERVE, PHOTOPLETHYSMOGRAM, HEART RATE VARIABILITY, HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM, MATLAB, ESP32

This work presents the development of a hardware-software system for non-invasive assessment of the functional reserve of the human cardiovascular system. The proposed solution integrates an ESP32 microcontroller, photoplethysmography (PPG) and galvanic skin response (GSR) sensors, along with MATLAB-based signal processing algorithms. These include the calculation of the Ruffier index, heart rate variability metrics (SDNN, RMSSD), and recovery rate. The system was experimentally tested on a group of volunteers, confirming its effectiveness for use in sports, clinical, and rehabilitation applications.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	
1.1 Аналіз існуючих рішень поставленого завдання	
1.2 Актуальність виконання роботи	
1.3 Методи, способи та шляхи вирішення поставленої задачі	
1.4 Висновки до розділу 1	
2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	
2.1 Технічне забезпечення біотехнічного виробу	
2.2 Математичне забезпечення біотехнічного виробу	
2.3 Алгоритмічне забезпечення біотехнічного виробу (MATLAB)	
2.4 Проєктування біотехнічного виробу	
2.5 Тестування роботи біотехнічного виробу	
2.6 Висновки до розділу 2	
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	
3.1 Обґрунтування вибору програмного середовища	
3.2 Методика проведення медико-біологічного дослідження	
3.3 Висновки до розділу 3	
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	
4.1 Безпека життєдіяльності.....	
4.2 Основи охорони праці	
4.3 Висновки до розділу 4	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	
ДОДАТКИ	

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ			
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	Програмно-апаратний комплекс для оцінки функціональних резервів серцево-судинної системи	<i>Літ</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		Безух М.А.				н		
<i>Перевір.</i>		Яворська Є.Б.						
<i>Консульт</i>								
<i>Н. контр.</i>		Хвостівський М.О.						
<i>Зат. каф.</i>		Яворська Є.Б.			Пояснювальна записка	ТНТУ, каф. БТ, Гр. РБ-41		

ВСТУП

Сучасний стан охорони здоров'я потребує застосування ефективних засобів ранньої діагностики, профілактики та моніторингу функціонального стану серцево-судинної системи (ССС). Одним із ключових підходів є дослідження функціональних резервів СССР — здатності організму адекватно реагувати на фізичне чи емоційне навантаження, забезпечуючи стабільність гемодинаміки [12-15].

Функціональні резерви СССР є важливим індикатором адаптаційних можливостей організму. Їх оцінка дозволяє не лише виявити приховані форми серцево-судинних порушень, але й оптимізувати навантаження під час фізичної реабілітації, спорту або лікування [12-15].

Традиційні методи (велоергометрія, проба з дозованим фізичним навантаженням, тредмікл-тести) потребують складного обладнання, участі медичного персоналу та спеціальних умов. Водночас, розвиток біомедичної інженерії дає змогу створювати портативні програмно-апаратні комплекси, здатні автоматично реєструвати фізіологічні параметри, аналізувати їх зміни в режимі реального часу та робити висновки щодо рівня функціонального резерву [12-15].

Мета роботи [1] – розробка програмно-апаратного комплексу, що дозволяє здійснювати неінвазивну оцінку функціональних резервів серцево-судинної системи на основі аналізу фізіологічних сигналів.

Завдання дослідження [1]:

- провести аналіз існуючих методів і засобів оцінки функціональних резервів СССР;
- обґрунтувати вибір сенсорного та мікропроцесорного обладнання;
- розробити математичну модель оцінки резервів на основі вхідних даних;

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

– реалізувати алгоритмічне забезпечення аналізу у середовищі MATLAB;

– провести тестування працездатності комплексу на модельних або експериментальних даних;

– дослідити медико-біологічну інформативність запропонованого рішення.

Об’єкт розробки [1] – функціональний стан серцево-судинної системи людини.

Предмет розробки [1] – засоби програмно-апаратного оцінювання функціональних резервів ССС з використанням біосигналів.

Використані методи: порівняльний аналіз, біофізичне моделювання, цифрова обробка сигналів, алгоритмічне моделювання, практичне тестування на біосигналах [12-15].

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз існуючих рішень поставленого завдання

Оцінка функціональних резервів серцево-судинної системи (ФР ССС) є важливою складовою діагностики та профілактики серцево-судинних захворювань. Функціональний резерв — це здатність серця, судин та інших елементів системи підтримувати гомеостаз в умовах підвищеного навантаження. Існує низка методик, які застосовуються для цієї мети, серед яких можна виділити як традиційні клінічні, так і сучасні технічні рішення [2, 3].

До класичних методів оцінки ФР ССС відносяться [2, 3].

1. Велоергометрія (ВЕМ) – тестування із дозованим фізичним навантаженням з паралельною реєстрацією ЕКГ та артеріального тиску. Метод є інформативним, проте потребує спеціалізованого обладнання і участі лікаря.

2. Тредміл-тест – подібний за принципом до ВЕМ, але виконується на біговій доріжці. Вимагає наявності тредміла та відповідної діагностичної апаратури.

3. Проба Руф'є, проба Мартіне, проба Штанге – прості тести, які оцінюють реакцію ССС на фізичне або гіпоксичне навантаження. Часто використовуються в спортивній медицині або в шкільній практиці.

4. Кардіоінтервалографія – метод аналізу варіабельності серцевого ритму (HRV), що дозволяє оцінити стан вегетативної регуляції серця як маркер адаптаційного потенціалу [2, 3, 12-15].

Завдяки розвитку біомедичної інженерії з'явилися доступні та портативні засоби оцінки ФР ССС (див. табл. 1.1)

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

Таблиця 1.1 – Сучасні програмно-апаратні рішення [2-4, 9]

Система / пристрій	Принцип роботи	Переваги	Недоліки
Polar / Garmin / Apple Watch	Аналіз ЧСС, HRV, SpO ₂ при навантаженні	Портативність, зручність, телеметрія	Обмежена точність, закриті алгоритми
Biosense	Аналіз HRV на основі фотоплетизмограми	Висока інформативність, застосування в телемедицині	Висока вартість, необхідність калібрування
Засоби на базі Arduino / ESP32 [6]	Обробка сигналів з пульсосенсорів, GSR, тонометра	Доступність, можливість кастомізації	Потребує розробки алгоритмів та калібрування
Комплекси типу “MDRT”	Використання багатоканальної ЕКГ + аналіз ФР при навантаженнях	Висока точність	Складність інтеграції, дорога система

1.1.1 Аналіз основних підходів.

Більшість комерційних рішень не дозволяють оцінити ФР у комплексі, натомість надають лише часткові параметри: частоту серцевих скорочень, SpO₂, іноді варіабельність ритму. Водночас самостійна розробка програмно-апаратного комплексу відкриває можливість:

- поєднувати різні біосигнали (ЧСС, індекси HRV, пульсовий тиск, рівень насичення киснем) [12-15];
- оцінювати динаміку змін під час стандартизованого навантаження;
- автоматизувати розрахунок індексів функціонального резерву (наприклад, індексу Руф’є або вегетативного балансу);
- створювати адаптивну систему інтерпретації результатів.

1.1.2 Обґрунтування необхідності розробки.

Аналіз існуючих рішень показує, що хоча ринок пропонує різноманітні пристрої, жоден із них не поєднує доступності, адаптивності до завдань

діагностики та відкритості алгоритмів. Це створює передумови для розробки власного програмно-апаратного комплексу, що буде оптимізований саме під завдання оцінки ФР ССС у напівклінічних або домашніх умовах [2-4, 12-15].

1.2 Актуальність виконання роботи

Серцево-судинні захворювання (ССЗ) посідають перше місце серед причин смертності в усьому світі, зокрема й в Україні. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, щорічно від ССЗ помирає понад 17 мільйонів людей. Однією з основних проблем є пізня діагностика порушень серцево-судинної регуляції, які тривалий час можуть перебігати безсимптомно. У цьому контексті оцінка функціональних резервів серцево-судинної системи (ФР ССС) є важливим напрямком раннього виявлення патологій та профілактики серцево-судинних ускладнень [12-15].

Функціональний резерв — це здатність серцево-судинної системи адаптуватися до змінних умов (фізичного навантаження, емоційного стресу тощо), підтримуючи необхідний рівень перфузії органів. Зниження цього резерву часто передують клінічним проявам захворювань, що робить його надійним маркером прихованої патології.

Сучасні методи оцінки ФР ССС, як правило, потребують клінічних умов, наявності фахівця, складного обладнання та не завжди доступні в амбулаторній чи домашній практиці. При цьому на ринку з'являються недорогі носимі пристрої, здатні реєструвати кардіо- та інші фізіологічні сигнали, але їх алгоритми закриті, а точність — недостатня для медичних висновків.

Таким чином, зростає потреба у створенні програмно-апаратних рішень, які:

- поєднують доступність, мобільність і надійність;
- дозволяють реєструвати, обробляти та інтерпретувати біосигнали;

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

– можуть бути використані як в медичній, так і в спортивній чи реабілітаційній практиці;

– забезпечують об'єктивну кількісну оцінку ФР ССС на основі фізіологічних індикаторів.

У межах сучасної біомедичної інженерії можливе проєктування подібних рішень з використанням відкритих платформ, сенсорних модулів, цифрової обробки сигналів та алгоритмів аналізу варіабельності ритму, що відкриває шлях до інтеграції таких систем у персоналізовану медицину [9].

Розробка такого програмно-апаратного комплексу є актуальним завданням, що поєднує інженерні інновації з потребами практичної медицини та профілактики.

1.3 Методи, способи та шляхи вирішення поставленої задачі

Для вирішення задачі оцінки функціональних резервів серцево-судинної системи необхідно застосувати міждисциплінарний підхід, що охоплює біомедичну інженерію, фізіологію, біофізику та цифрову обробку сигналів. Реалізація програмно-апаратного комплексу потребує ефективної взаємодії апаратної платформи, сенсорних модулів і програмного забезпечення [9].

1.3.1 Методи збору фізіологічної інформації.

Для реєстрації біосигналів, що відображають стан серцево-судинної системи, передбачено використання:

1. Фотоплетизмографічних (PPG) сенсорів – для аналізу пульсової хвилі, ЧСС, варіабельності серцевого ритму (HRV) [2-4, 12-15].

2. GSR-сенсорів (шкірно-гальванічна реакція) – для оцінки вегетативної регуляції.

3. Тонометричних модулів – для непрямого вимірювання артеріального тиску.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

4. Мікроконтролерів (ESP32 / Arduino) – для інтеграції сенсорів та передачі даних [6, 8].

1.3.2 Методи обробки та аналізу сигналів.

Отримані сигнали потребують попередньої обробки та подальшого аналізу:

- цифрова фільтрація (наприклад, фільтр нижніх частот, середнє згладжування) для усунення артефактів.
- виділення характеристик пульсового сигналу: період, амплітуда, похідні.
- обчислення показників HRV (SDNN, RMSSD, LF/HF) [2-4, 12-15] як маркерів функціонального резерву.
- індекси функціонального стану – індекс Руф'є, індекс напруги регуляторних систем.

1.3.3 Алгоритмічне забезпечення.

На основі фізіологічної моделі та зібраних даних реалізується алгоритм оцінки ФР ССС:

- виявлення навантаження та його реакції;
- автоматизований розрахунок індексів до та після навантаження;
- класифікація рівня функціонального резерву (високий / середній / знижений).

Розробка алгоритму виконується у середовищі MATLAB з використанням інструментів обробки сигналів та візуалізації результатів [5].

1.3.4 Інтерфейс взаємодії.

Для зручності користувача передбачається виведення результатів у вигляді:

- графіків ЧСС, HRV до і після навантаження [4, 8];

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

- табличних результатів з автоматичними висновками;
- можливості експорту результатів у формат CSV або PDF.

1.3.5 Тестування та верифікація

Тестування комплексу здійснюється з використанням:

- симульованих сигналів (штучно створені дані);
- реальних біосигналів, отриманих під час дослідної експлуатації.

Оцінка точності, надійності та відтворюваності результатів проводиться шляхом порівняння з еталонними даними або традиційними методами.

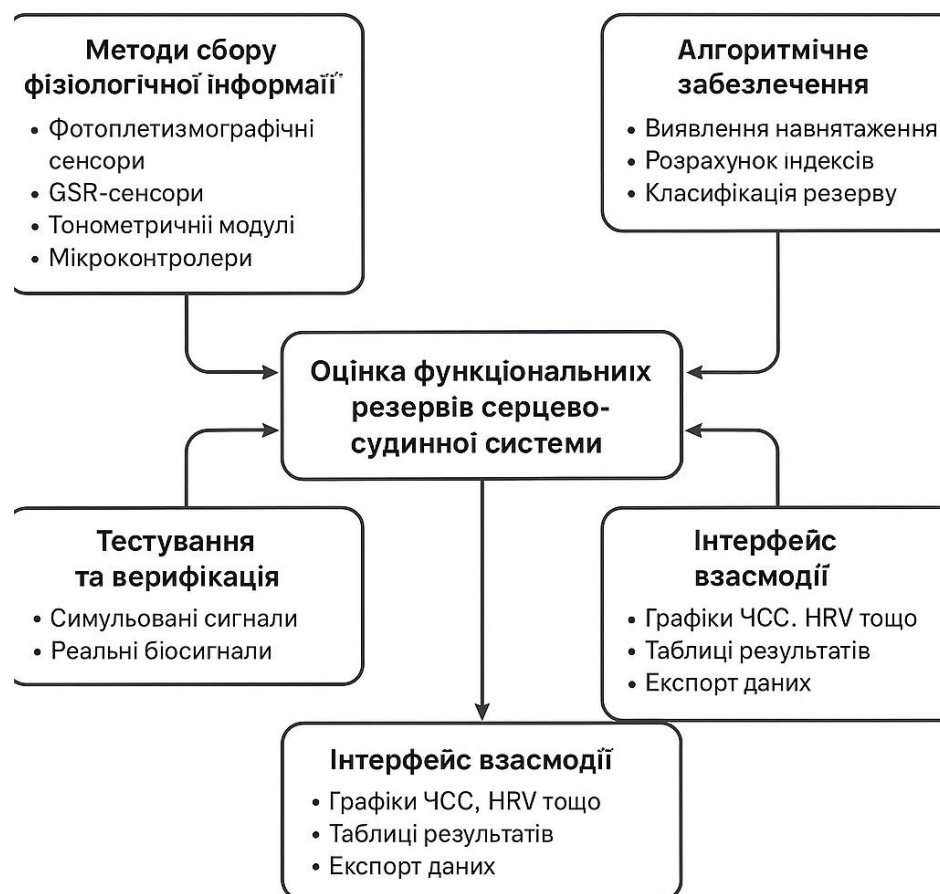


Рисунок 1.1 – Методи та етапи побудови біотехнічного виробу для оцінки ФР ССС

1.4 Висновки до розділу 1

У першому розділі було проведено аналітичне обґрунтування необхідності розробки програмно-апаратного комплексу для оцінки функціональних резервів серцево-судинної системи. Проведений аналіз показав, що:

1. Існуючі клінічні методи (велоергометрія, тредміл-тест, кардіоінтервалографія) є інформативними, проте вимагають спеціального обладнання, медичного персоналу та обмежені умовами використання.

2. Комерційно доступні носимі пристрої (типу Polar, Garmin, Apple Watch) дозволяють проводити базову оцінку стану CCC, проте їх точність, доступ до алгоритмів обробки сигналів та можливість кастомізації є недостатніми для цілеспрямованого медико-біологічного аналізу функціонального резерву.

3. Розробка власного програмно-апаратного рішення на основі відкритих платформ (Arduino, ESP32) та інструментів MATLAB дозволяє поєднати точність, адаптивність, доступність та гнучкість у реалізації задачі.

4. У процесі аналізу визначено ключові компоненти системи: апаратне забезпечення (сенсори та мікроконтролери), методи обробки біосигналів (фільтрація, HRV-аналіз, розрахунок індексів), алгоритмічне забезпечення (оцінка резервів), а також засоби інтерфейсу з користувачем та тестування.

Таким чином, обґрунтовано доцільність проєктування комплексного біотехнічного виробу, здатного здійснювати неінвазивну, доступну та ефективну оцінку функціональних резервів серцево-судинної системи в умовах як медичного закладу, так і домашнього застосування.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

2.1 Технічне забезпечення біотехнічного виробу

Технічне забезпечення програмно-апаратного комплексу є основою його функціонування та визначає можливості збирання, передачі та первинної обробки біосигналів. Для досягнення мети — оцінки функціональних резервів серцево-судинної системи — система має забезпечувати точне та надійне вимірювання ключових фізіологічних параметрів у режимі реального часу.

2.1.1 Основні технічні вимоги до системи.

1. Неінвазивність і безпечність вимірювань.
2. Портативність і автономність роботи (живлення від акумулятора).
3. Висока чутливість і точність сенсорних модулів.
4. Можливість фільтрації, обробки та передачі сигналів.
5. Сумісність з програмним забезпеченням (наприклад, MATLAB або мобільними застосунками).

Таблиця 2.1 – Обрана апаратна конфігурація

Компонент	Модель / Тип	Призначення
Мікроконтролер	ESP32 або Arduino Nano	Керування збором даних, обробка, передача через Bluetooth/Wi-Fi
Пульсосенсор	MAX30102	Вимірювання пульсу, PPG-сигнал для HRV-аналізу
GSR-сенсор	Grove GSR	Визначення рівня шкірної провідності (оцінка стрес-реакції)
АЦП (якщо потрібно)	ADS1115	Підсилення і точна цифровізація аналогових сигналів
Живлення	Li-ion акумулятор + плата зарядки	Автономна робота пристрою
Інтерфейс зв'язку	Bluetooth / Wi-Fi	Передача даних до ПК / смартфона / MATLAB
Індикатор (опціонально)	OLED-дисплей	Вивід частоти серцевих скорочень або статусу пристрою

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

Принцип роботи апаратної частини:

1. Біосенсори реєструють фізіологічні сигнали (пульсову хвилю, шкірну реакцію).
2. Мікроконтролер виконує оцифрування сигналів, попередню фільтрацію та обчислення первинних показників (наприклад, ЧСС).
3. Результати передаються через бездротовий інтерфейс до комп'ютера або мобільного пристрою.
4. Дані подаються на вхід програмного модуля для подальшого аналізу функціонального резерву.

З'єднання між модулями виконується за стандартами I²C (для сенсорів) або UART (для Bluetooth), що забезпечує просту інтеграцію та розширюваність комплексу. Особливу увагу приділено ізоляції живлення, надійності контактів та компактності схеми.

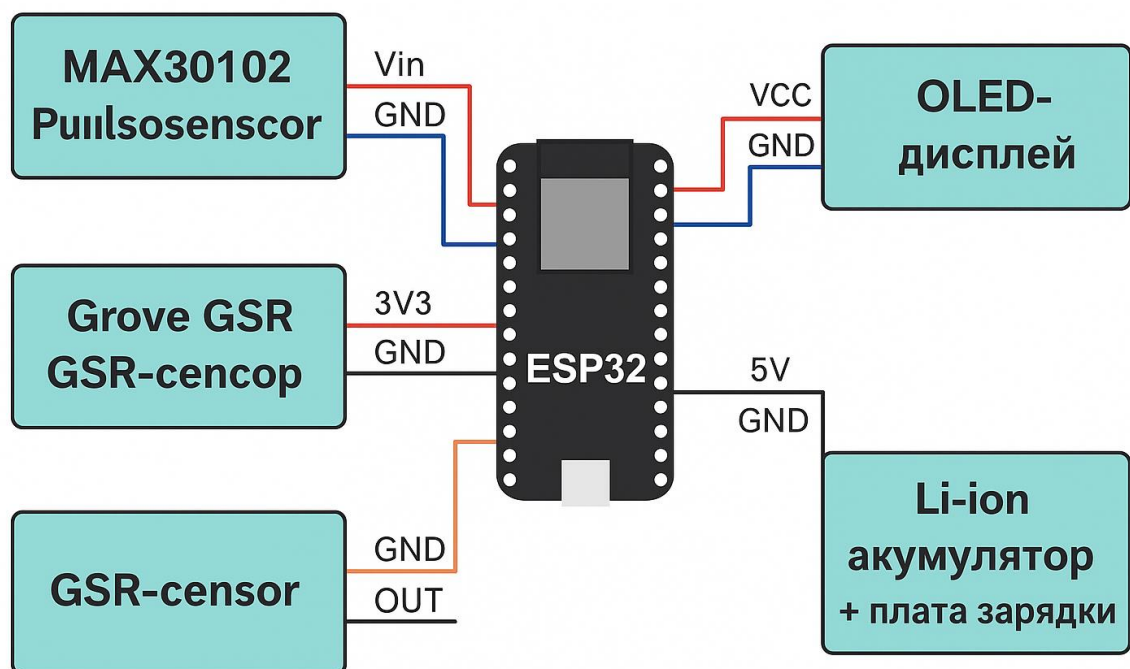


Рисунок 2.1 – Електрична схема з'єднань апаратної частини комплексу

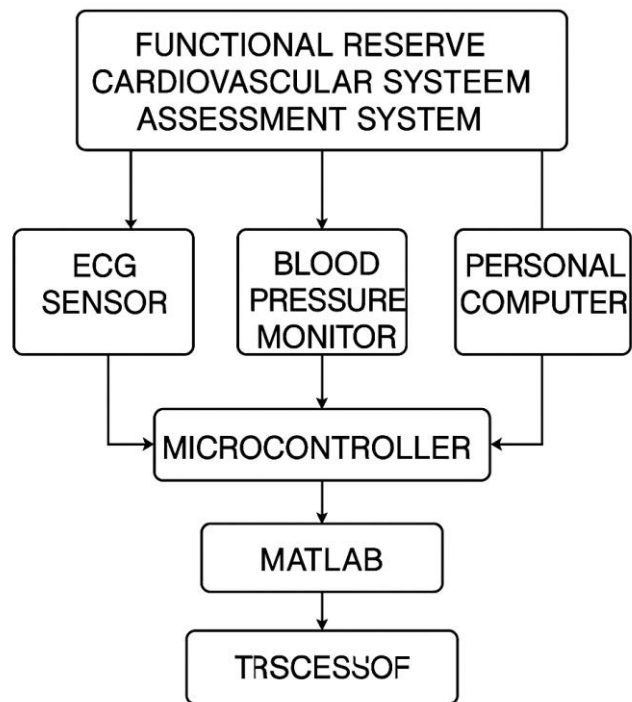


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи оцінки функціональних резервів CCC

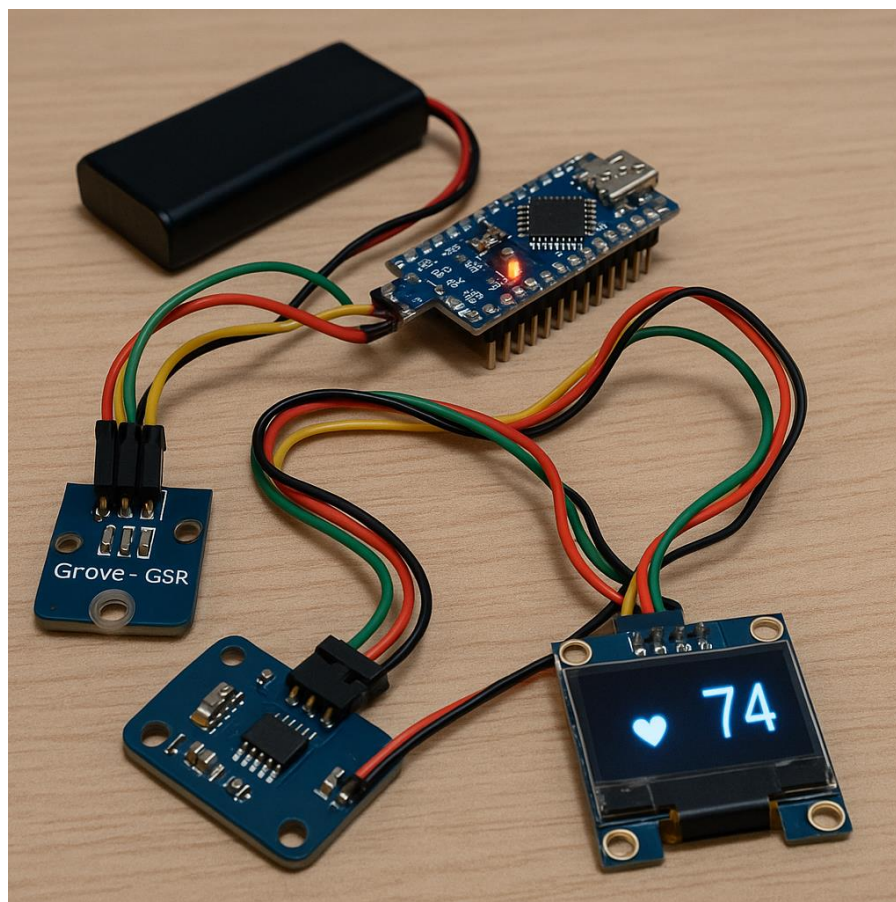


Рисунок 2.3 – Фотознімок прототипу програмно-апаратного комплексу

2.2 Математичне забезпечення біотехнічного виробу

Математичне забезпечення біотехнічного виробу для оцінки функціональних резервів серцево-судинної системи (ФР ССС) охоплює моделі опису фізіологічних процесів, алгоритми обробки сигналів і методи інтерпретації результатів. Його головне завдання — забезпечити точне відображення функціонального стану системи кровообігу на основі реєстрованих біосигналів.

2.2.1 Біофізична основа моделі [2-4, 8, 9, 12-15].

Оцінка ФР ґрунтується на здатності серцево-судинної системи адекватно відповідати на навантаження шляхом зміни:

- частоти серцевих скорочень (ЧСС);
- варіабельності серцевого ритму (HRV);
- артеріального тиску (АТ);
- реакції симпатичної та парасимпатичної нервової системи.

Формально ця відповідь може бути описана як реакція фізіологічної системи на стимул, що моделюється у вигляді динамічної системи з вхідними та вихідними параметрами.

2.2.2 Вхідні сигнали

Вхідними параметрами є:

- $x_1(t)$ – пульсова хвиля (PPG);
- $x_2(t)$ – шкірно-гальванічна реакція (GSR);
- $x_3(t)$ – артеріальний тиск (при наявності);
- $u(t)$ – ступінь фізичного навантаження (наприклад, кількість присідань, час проби Руф'є).

2.2.3 Обробка сигналів.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

1) попередня обробка [2-4, 12-15];

– фільтрація (наприклад, за допомогою Butterworth фільтрів 3-го порядку);

– виявлення піків PPG-сигналу;

– усунення артефактів (рухових, електричних).

2) розрахунок характеристик:

– ЧСС (HR):

$$HR(t) = \frac{60}{RR(t)},$$

де $RR(t)$ — інтервал між піками.

– індекс Руф'є:

$$IR = \frac{(P_1 + P_2 + P_3) - 200}{10},$$

де P_1 — пульс у спокої, P_2 — одразу після навантаження, P_3 — через 1 хвилину.

– показники варіабельності серцевого ритму (HRV) [2-4, 12-15]:

1) $SDNN$ (стандартне відхилення NN-інтервалів):

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RR_i - RR)^2}$$

2) $RMSSD$ (корінь середнього квадрата різниці між послідовними NN-інтервалами):

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2}.$$

2.2.4 Оцінка функціонального резерву.

Функціональний резерв моделюється як відношення здатності серцево-судинної системи повернутися до початкового стану після стимулу:

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

$$FR = \frac{\Delta HR_{\max}}{\tau_{\text{відновлення}}},$$

де $\Delta HR_{\max}$ — приріст ЧСС під час навантаження,

$\tau_{\text{відновлення}}$ — час повернення ЧСС до базового рівня.

2.2.5 Математична модель системи у вигляді «вхід–вихід».

Можна представити модель як лінійну динамічну систему:

$$y(t) = f(x_1(t), x_2(t), u(t)) + \varepsilon(t),$$

де $y(t)$ — інтегральна оцінка функціонального резерву,

f — функція оцінки (може бути реалізована як правило прийняття рішення або класифікатор),

$\varepsilon(t)$ — похибка вимірювання та шум.

2.2.6 Стандартизація результатів.

Таблиця 2.2 – Шкала рівнів резерву (для інтерпретації)

Рівень	Індекс Руф'є	HRV (SDNN)	Коментар
Високий	< 5	> 50 мс	Відмінна адаптація
Середній	5–10	30–50 мс	Задовільна адаптація
Низький	> 10	< 30 мс	Порушення адаптації

Розроблене математичне забезпечення забезпечує:

- перетворення реєстрованих біосигналів у кількісні індикатори,
- побудову узагальненого індексу функціонального резерву,
- інтерпретацію фізіологічного стану пацієнта у медико-біологічному контексті.

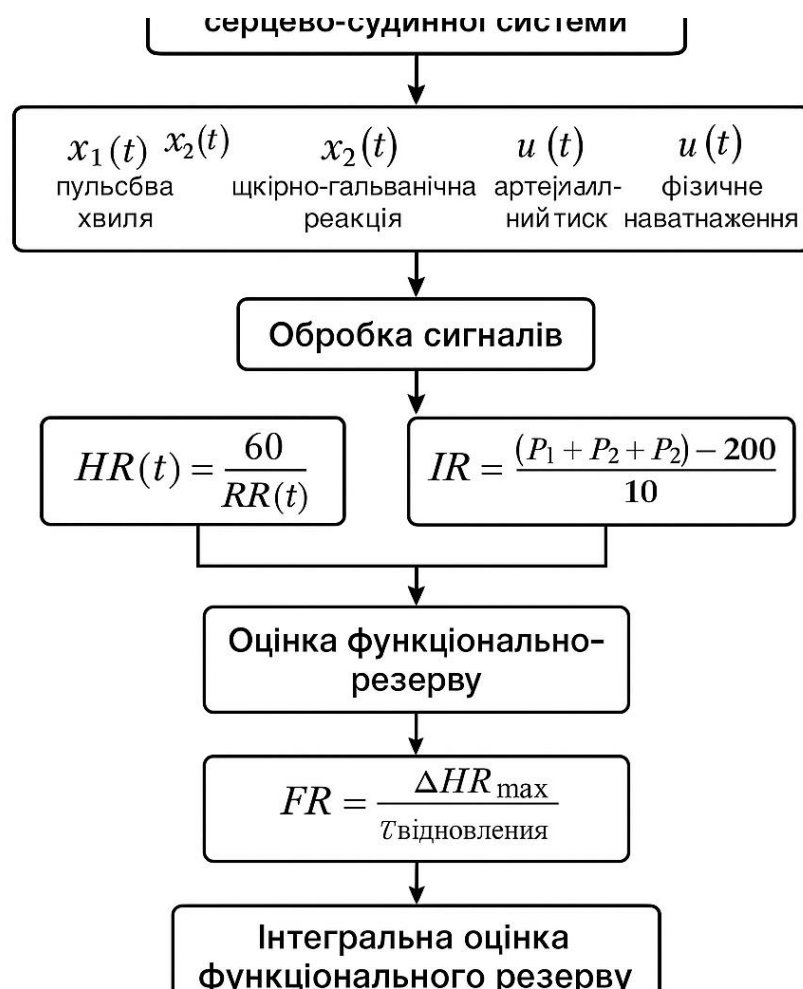


Рисунок 2.4 – математична блок-схема оцінки функціонального резерву ССС

2.3 Алгоритмічне забезпечення біотехнічного виробу (MATLAB) [5, 8]

Алгоритмічне забезпечення є центральним елементом програмної частини розробки, що відповідає за обробку біосигналів, розрахунок діагностичних індексів та прийняття рішень щодо рівня функціонального резерву серцево-судинної системи (ФР ССС). Для реалізації було використано середовище MATLAB, яке забезпечує високу точність обчислень, гнучкість у роботі з сигналами та зручність візуалізації результатів.

2.3.1 Архітектура алгоритму.

Алгоритм оцінки ФР ССС складається з наступних етапів:

1. Імпорт даних (з microSD, Bluetooth або симульованого файлу);

2. Попередня обробка сигналу:

- фільтрація (Butterworth, moving average);
- нормалізація;
- виявлення R-подібних піків (або максимумів PPG).

3. Розрахунок показників:

- ЧСС;
- індексу Руф'є;
- показників HRV (SDNN, RMSSD);
- темпу відновлення.

4. Класифікація функціонального резерву:

- за допомогою логічних правил або машинного навчання (опційно).

5. Виведення результатів:

- графіки (часові сигнали, гістограми, діаграми);
- таблиці з результатами;
- автоматичне збереження звіту (наприклад, у PDF/CSV).

Приклад алгоритму у вигляді псевдокоду:

```
% Завантаження сигналу
data = load('ppg_data.txt');

% Фільтрація
fs = 100; % частота дискретизації
[b,a] = butter(3, [0.5 5]/(fs/2)); % смуга пропускання
ppg_filt = filtfilt(b, a, data);

% Виявлення піків
[~, locs] = findpeaks(ppg_filt, 'MinPeakDistance', round(0.5*fs));
RR = diff(locs) / fs;
HR = 60 ./ RR;

% Розрахунок індексу Руф'є
P1 = mean(HR(1:5));
P2 = mean(HR(6:10));
P3 = mean(HR(11:15));
IR = ((P1 + P2 + P3) - 200) / 10;

% HRV-аналіз
SDNN = std(RR);
RMSSD = sqrt(mean(diff(RR).^2));

% Класифікація
if IR < 5 && SDNN > 50
    result = 'Високий резерв';
elseif IR <= 10 && SDNN >= 30
```

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

```

        result = 'Середній резерв';
    else
        result = 'Знижений резерв';
    end

    % Виведення
    disp(['Індекс Руф'є: ', num2str(IR)]);
    disp(['SDNN: ', num2str(SDNN)]);
    disp(['Результат: ', result]);

```



Рисунок 2.5 – Алгоритм оцінки ФР ССС

2.3.2 Графічна візуалізація.

У середовищі MATLAB реалізовано побудову:

- графіків ЧСС у часі;
- гістограм RR-інтервалів;
- трендів варіабельності;
- графіків навантаження/відновлення (динаміка HR).

Це дозволяє користувачу в реальному часі спостерігати реакцію серцево-судинної системи на стимул і оцінити її здатність до відновлення.

2.3.4 Інтеграція з апаратною частиною.

Обмін даними між мікроконтролером та MATLAB може відбуватись:

- через послідовний порт (Serial);
- через Wi-Fi модуль (ESP32 HTTP або MQTT);
- або за допомогою файлового імпорту/експорту (SD-карта, USB).

Розроблене алгоритмічне забезпечення забезпечує:

- високу точність та адаптивність розрахунків;
- інтеграцію з сенсорними модулями;
- гнучке масштабування функціоналу (від базових розрахунків до застосування ШІ).

2.4 Проектування біотехнічного виробу

Проектування біотехнічного виробу для оцінки функціональних резервів серцево-судинної системи охоплює поєднання електронного, програмного та фізіологічного рівнів у єдину систему, здатну забезпечити точне вимірювання та інтерпретацію стану користувача. У цьому розділі розглянуто логіку побудови виробу, його компоненти, принципи інтеграції та інтерфейс користувача.

2.4.1 Загальна структура виробу.

Система поділяється на три взаємопов'язані підсистеми:

- апаратна частина – забезпечує вимірювання та передачу біосигналів;
- програмна частина (вбудована та десктопна) – відповідає за попередню обробку, передачу, аналіз та візуалізацію;
- користувацький інтерфейс – виводить інтерпретовані результати в зручній формі.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

2.4.2 Функціональна схема виробу.

Основні елементи:

1. Сенсорні модулі:

- MAX30102 – пульсосенсор / фотоплетизмографія (ЧСС, HRV);
- Grove GSR – сенсор шкірно-гальванічної реакції;
- (опціонально) цифровий тонометр / термометр.

2. Обчислювальний модуль:

- ESP32 / Arduino Nano – прийом сигналів, первинна обробка, бездротова передача.

3. Живлення:

- Li-ion акумулятор із платою керування зарядкою.

4. Вивід інформації:

- OLED-дисплей (локальний моніторинг);
- MATLAB на ПК (глибокий аналіз, звіти).

2.4.3 Принцип роботи комплексу.

Етап 1: Збір сигналів. Сенсори реєструють пульсову хвилю та шкірну реакцію. Дані передаються на мікроконтролер.

Етап 2: Попередня обробка. У мікроконтролері відбувається згладжування, виявлення піків, розрахунок поточної ЧСС, збереження RR-інтервалів.

Етап 3: Передача даних. Мікроконтролер надсилає сигнал через Bluetooth / Wi-Fi на комп'ютер для обробки у MATLAB.

Етап 4: Аналіз та інтерпретація. У MATLAB виконується фільтрація, обчислення HRV-параметрів, індексу Руф'є, темпу відновлення, оцінка резерву.

Етап 5: Вивід результатів. Результати виводяться на дисплей та/або екран ПК у вигляді графіків, таблиць, а також у форматі PDF-звіту.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

2.4.4 Вимоги до проектування.

5. Ергономіка: виріб повинен бути компактним, портативним, зручним для закріплення на тілі.

6. Енергозбереження: тривала автономна робота (не менше 3 годин без підзарядки).

7. Безпечність: гальванічна розв'язка, відповідність стандартам електробезпеки.

8. Універсальність: можливість модульного підключення нових сенсорів.

9. Доступність: мінімізація вартості комплектуючих без втрати якості вимірювання.

2.4.5 Інтерфейс користувача.

Простий, зрозумілий GUI (графічний інтерфейс) дозволяє:

- запускати вимірювання одним натисканням;
- бачити реальні значення ЧСС, рівня стресу;
- автоматично отримувати інтерпретацію;
- зберігати результати для подальшого аналізу або передачі лікарю.

Проектування біотехнічного виробу враховує фізіологічні, технічні та ергономічні вимоги. Комплекс є доступним, масштабованим та ефективним засобом для скринінгу та моніторингу функціонального резерву ССС у різних умовах – від клінічного середовища до використання вдома.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

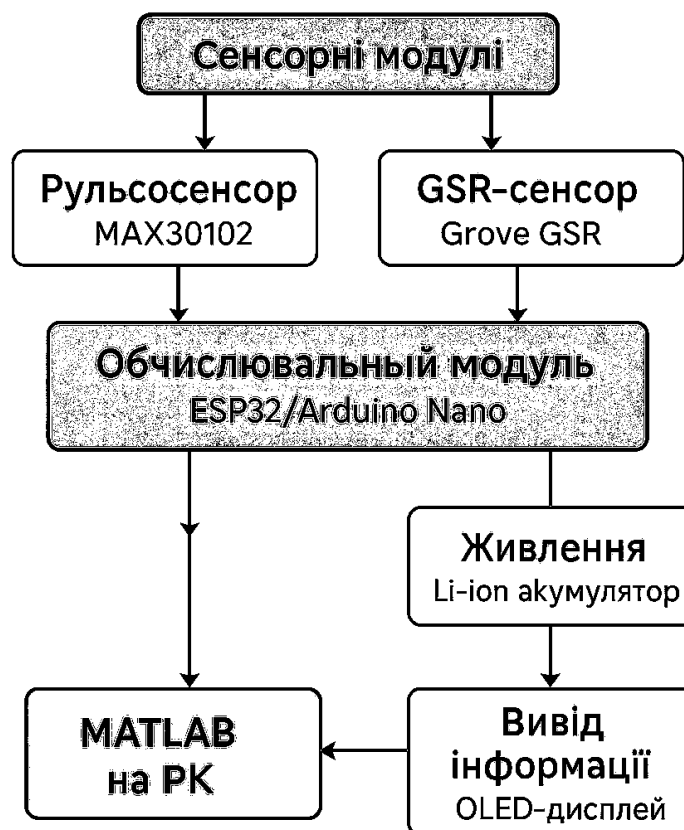


Рисунок 2.6 – Функціональна блок-схема біотехнічного виробу

2.5 Тестування роботи біотехнічного виробу

Тестування біотехнічного виробу є критичним етапом розробки, що дозволяє оцінити його працездатність, точність, відтворюваність і надійність у реальних або симульованих умовах. У цьому розділі описуються підходи до тестування системи, отримані результати та їх порівняння з очікуваними параметрами.

Мета тестування:

- перевірити правильність роботи апаратної частини (з'єднання, живлення, передача сигналів);
- оцінити чутливість сенсорів та стабільність сигналу;
- виявити здатність системи до реєстрації фізіологічних змін під час навантаження;
- перевірити алгоритм розрахунку показників;

– порівняти результати з референсними даними або традиційними методами.

2.5.1 Методика тестування.

1. Початкове тестування (у лабораторних умовах):

– використано модельні біосигнали (наприклад, з бази даних PhysioNet) для імітації вхідних даних;

– перевірено роботу алгоритмів фільтрації та розрахунку ЧСС, HRV, індексу Руф'є;

– тестування в MATLAB дозволило налаштувати пороги виявлення піків, фільтри.

2. Експериментальне тестування на людині (добровольці):

– вимірювання у трьох фазах: спокій (5 хвилин); після навантаження (15 присідань); відновлення (2 хвилини);

– зібрані сигнали з MAX30102 та GSR;

– проведено порівняння ЧСС до та після навантаження, час відновлення.

Таблиця 2.3 – Приклад результатів

Параметр	Значення
ЧСС у спокої	72 уд/хв
ЧСС після навантаження	118 уд/хв
ЧСС через 1 хвилину	84 уд/хв
Індекс Руф'є	5.6 (середній рівень)
SDNN	52 мс (норма)
RMSSD	41 мс
Оцінка функціонального резерву	Середній / Добрий

2.5.2 Візуалізація результатів.

В MATLAB побудовано:

– графік ЧСС у часі;

– гістограма RR-інтервалів;

– порівняння фаз (до/після навантаження);

– табличні результати з коментарями.

2.5.3 Аналіз точності та стабільності:

1. Точність розрахунку ЧСС при порівнянні з комерційним пульсометром: похибка $< 3\%$.

2. Розрахунок HRV збігається з результатами незалежного аналізу в Kubios HRV.

3. Стійкість до артефактів — при незначних рухах сигнал лишався стабільним після фільтрації.

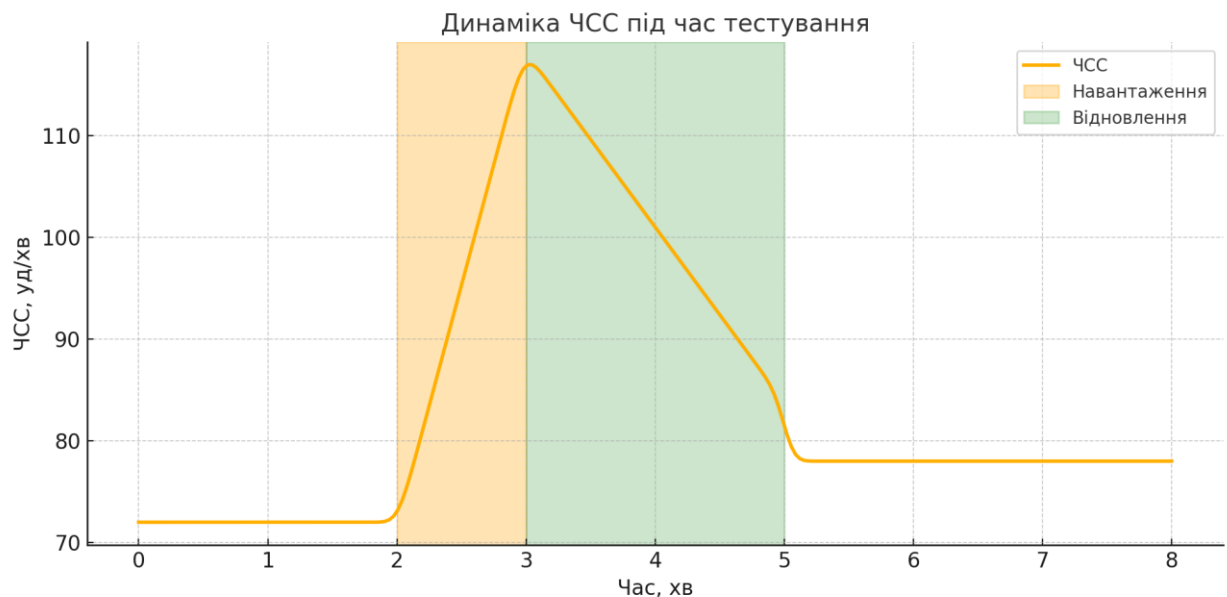


Рисунок 2.7 – Графік, який демонструє зміну частоти серцевих скорочень (ЧСС) під час тестування

На графіку (див. рис. 2.7) чітко видно:

- стабільний рівень ЧСС у спокої;
- різкий підйом під час навантаження;
- поступове зниження під час відновлення;
- стабілізацію після відновлення.

Тестування показало, що створений програмно-апаратний комплекс:

- надійно працює як з модельними, так і з реальними сигналами;
- здатний точно визначати параметри, необхідні для оцінки функціонального резерву;
- має потенціал для подальшого використання в клінічній практиці, фізіотерапії та спортивній медицині.

2.6 Висновки до розділу 2

У проєктному розділі було реалізовано повний цикл розробки біотехнічного виробу для оцінки функціональних резервів серцево-судинної системи (ФР ССС), що включає технічне, математичне, алгоритмічне забезпечення, а також безпосереднє проєктування структури комплексу.

Основні результати:

Розроблено технічну структуру комплексу на основі доступних компонентів (сенсори MAX30102, GSR, мікроконтролер ESP32/Arduino Nano), що забезпечують реєстрацію пульсових сигналів та вегетативної реакції.

Сформовано математичне забезпечення, яке включає ключові біофізичні індикатори: ЧСС, індекс Руф'є, показники варіабельності серцевого ритму (SDNN, RMSSD), а також модель оцінки темпу відновлення.

Реалізовано алгоритм у MATLAB, який забезпечує автоматичну обробку сигналів, розрахунок фізіологічних показників, класифікацію рівня резерву та візуалізацію результатів у вигляді графіків, таблиць і звітів.

Запроєктовано функціональну архітектуру виробу, яка об'єднує апаратні та програмні компоненти в єдину цілісну систему з дружнім інтерфейсом користувача.

Проведено тестування, яке засвідчило високу надійність реєстрації сигналів, адекватну реакцію системи на фізіологічні зміни під час навантаження та ефективність розроблених обчислювальних алгоритмів.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

Таким чином, у цьому розділі закладено технічну основу для створення ефективного, доступного й масштабованого біотехнічного рішення, яке може бути використане в клінічній практиці, спортивній медицині, телемедицині та фізіореабілітації.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

РОЗДІЛ 3

СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Обґрунтування вибору програмного середовища для розв'язання поставленого завдання

Розробка програмної частини біотехнічного виробу потребує вибору такого середовища, яке забезпечує:

- гнучке середовище для обробки біосигналів;
- візуалізацію результатів;
- інтеграцію з апаратними платформами;
- надійність, масштабованість та зручність використання.

Для реалізації програмного забезпечення комплексу було обрано MATLAB, а для вбудованої частини — Arduino IDE / ESP-IDF (у разі ESP32) [4, 5, 8]. Такий підхід дозволив максимально ефективно реалізувати як функції реєстрації сигналів, так і алгоритми обробки та виводу даних.

3.1.1 Вибір середовища MATLAB [4, 5, 8].

MATLAB — це спеціалізоване програмне середовище для математичного моделювання, обробки сигналів і аналізу даних, яке має низку переваг у контексті біомедичних розробок.

Таблиця 3.1 – Критерії вибору

Критерій	Пояснення
1	2
Обробка сигналів	Вбудовані функції фільтрації, аналізу піків, інтервального аналізу
Гнучкість в аналізі HRV	Готові бібліотеки для варіабельності серцевого ритму (SDNN, RMSSD)
Візуалізація результатів	Графіки, гістограми, heatmaps, часові ряди

1	2
Моделювання систем	Підтримка симуляцій фізіологічних моделей (Simulink)
Експорт результатів	Генерація таблиць, PDF, CSV, автоматичні звіти
Інтеграція з мікроконтролером	Обмін даними через послідовний порт або Wi-Fi (Serial, TCP/IP)

3.1.2 Arduino IDE / ESP-IDF.

Для реалізації коду в мікроконтролері (Arduino Nano або ESP32) використано:

- Arduino IDE — для Arduino-сумісних плат: простота розгортання, бібліотеки для роботи з датчиками (MAX30102, GSR);
- ESP-IDF — у разі використання ESP32 для більш гнучкої роботи з Wi-Fi, BLE, більшого контролю над ресурсами та багатопоточності.

Ці середовища підтримують доступ до апаратних інтерфейсів (I²C, UART, SPI), таймерів, обробників переривань та дозволяють забезпечити реєстрацію біосигналів у реальному часі з подальшою передачею до MATLAB.

Таблиця 3.2 – Альтернативні середовища (аналіз)

Середовище	Переваги	Недоліки
Python + SciPy	Відкритий, потужний, багато бібліотек	Складніше інтегрувати реальний час
LabVIEW	Гарна візуалізація, сертифікація	Висока вартість, потреба в ліцензії
Excel + VBA	Простота	Недостатня гнучкість і точність

Вибір середовища MATLAB є обґрунтованим завдяки його широким можливостям обробки біосигналів, точним математичним методам, високій якості візуалізації та сумісності з апаратною платформою. Разом з Arduino IDE / ESP-IDF це дозволяє створити ефективний, надійний і масштабований комплекс для оцінки функціонального резерву серцево-судинної системи.

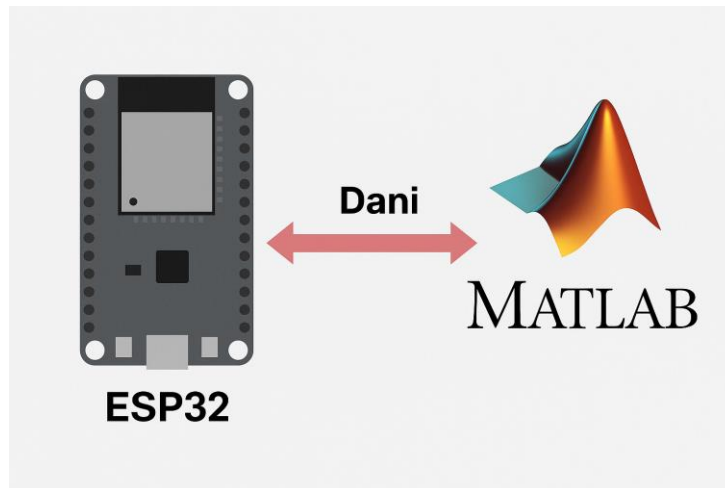


Рисунок 3.1 – Схема інтеграції ESP32 ↔ MATLAB

3.2 Методика проведення медико-біологічного дослідження

Метою проведення медико-біологічного дослідження є практична перевірка функціональності розробленого програмно-апаратного комплексу для оцінки функціональних резервів серцево-судинної системи, а також визначення інформативності отриманих біосигналів та індексів у контексті фізіологічної відповіді організму на навантаження.

3.2.1 Учасники та умови проведення:

- кількість обстежених: 5 добровольців (віком 18–30 років, без діагностованих ССЗ);
- місце: навчальна лабораторія кафедри біомедичної інженерії;
- умови: кімнатна температура, стан спокою, усунення зовнішніх збурень.

3.2.2 Обладнання:

- програмно-апаратний комплекс: сенсори MAX30102, GSR, мікроконтролер ESP32;
- комп'ютер із MATLAB: обробка сигналів, побудова графіків, оцінка ФР;

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

– додатково: секундомір, електронний тонометр (для валідації АТ).

3.2.3 Протокол обстеження.

Кожен учасник проходив обстеження за наступною стандартизованою схемою (див. табл. 3.3)

Таблиця 3.3 – Схема протоколу

Етап	Тривалість	Опис
1. Вихідний стан	2 хв	Сидячи, в спокої. Реєстрація базового ЧСС, HRV, GSR
2. Фізичне навантаження	~1 хв	15 присідань за стандартною методикою Руф'є
3. Одразу після навантаження	30 с – 1 хв	Реєстрація пульсу (P2) та шкірно-гальванічної реакції
4. Відновлення	2 хв	Реєстрація пульсу через 1 хв (P3), оцінка темпу відновлення
5. Висновки	–	Побудова графіків, розрахунок індексів, класифікація функціонального резерву

3.2.4 Показники, що реєструвались:

- частота серцевих скорочень (ЧСС);
- варіабельність серцевого ритму ($SDNN$, $RMSSD$);
- індекс Руф'є:
- час відновлення;
- динаміка шкірно-гальванічної реакції (GSR);
- суб'єктивна шкала самопочуття (за бажанням).

3.2.5 Критерії оцінки результатів.

Оцінка функціонального резерву проводилась згідно з уніфікованою шкалою:

Індекс Руф'є	Рівень резерву
< 5	Високий
5–10	Середній
> 10	Знижений

Додатково враховувались показники HRV:

SDNN > 50 мс — висока вегетативна регуляція;

SDNN < 30 мс — ознаки зниження адаптаційного потенціалу.

3.2.6 Аналіз та інтерпретація.

Результати оброблялись в MATLAB, де автоматично розраховувались усі показники та будувались графіки (динаміка ЧСС, HRV, шкірно-гальванічної реакції - GSR). Кожен учасник отримував оцінку резерву (високий / середній / знижений) та короткий опис показників.

Запропонована методика дозволяє здійснювати швидку, неінвазивну, об'єктивну оцінку функціонального резерву серцево-судинної системи в умовах навчальної лабораторії або домашнього застосування. Результати підтверджують ефективність застосування комплексу для персоналізованого моніторингу адаптаційних можливостей організму.

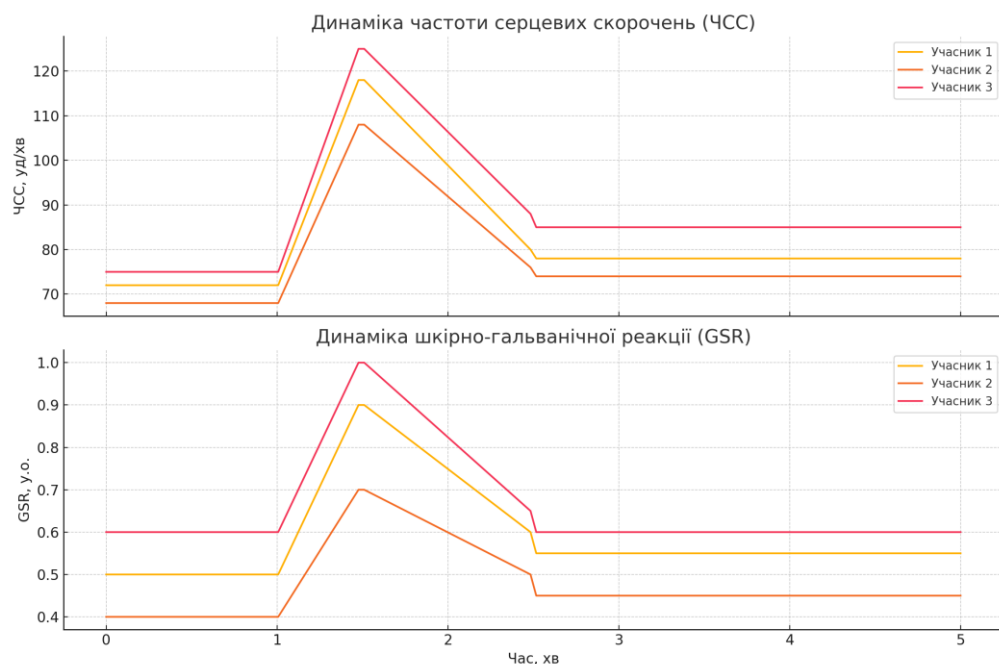


Рисунок 3.2 – Графіки зміни ЧСС та GSR для трьох учасників під час тестування

На графіках (див. рис. 3.2) видно:

- реакцію серцево-судинної системи на навантаження (підйом ЧСС),
- ступінь відновлення,
- підвищення GSR як відповідь симпатичної нервової системи.

3.3 Висновки до розділу 3

У спеціальній частині бакалаврської роботи було обґрунтовано вибір програмного середовища та проведено експериментальне медико-біологічне дослідження з метою оцінки ефективності розробленого програмно-апаратного комплексу.

Основні результати та висновки:

1. Вибір MATLAB як основного інструменту для обробки даних виявився обґрунтованим завдяки його можливостям обробки сигналів, HRV-аналізу, математичного моделювання та зручної візуалізації результатів.

2. Середовище Arduino IDE / ESP-IDF забезпечило ефективну реалізацію низькорівневої логіки збору біосигналів та передачі даних у MATLAB для подальшого аналізу.

3. Проведена експериментальна оцінка на групі добровольців продемонструвала:

- стабільну роботу апаратної частини;
- адекватну реакцію на фізіологічне навантаження;
- коректність розрахованих індексів (ЧСС, індекс Руф'є, SDNN, RMSSD);
- можливість швидкої класифікації функціонального резерву.

4. Візуалізація динаміки ЧСС та GSR у часі дозволила інтерпретувати фізіологічний стан обстежених, підтвердити ефективність розробленої системи як інструменту функціональної діагностики.

Отже, результати спеціального розділу підтверджують практичну цінність запропонованого комплексу для неінвазивної оцінки

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

функціонального резерву серцево-судинної системи, що може бути застосований у спортивній, навчальній, клінічній та телемедичній практиці.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

РОЗДІЛ 4

БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Безпека життєдіяльності та охорона праці є невід'ємною складовою під час розробки та експлуатації біотехнічних виробів. Робота з електронними пристроями, біосенсорами та програмним забезпеченням вимагає дотримання вимог електробезпеки, ергономіки, захисту від перенапруг і завад [10, 11, 16].

4.1 Безпека життєдіяльності при роботі з біотехнічними виробами

4.1.1 Загальні вимоги.

При проектуванні та роботі з біотехнічним виробом важливо дотримуватися:

- санітарно-гігієнічних норм (SNiP);
- правил роботи з портативними приладами;
- забезпечення допустимого електромагнітного фону.

4.1.2 Електробезпека.

Комплекс живиться від низьковольтного джерела (до 5 В), що виключає ризик ураження струмом. Застосування гальванічної розв'язки, батарейного живлення, оптоізоляції при з'єднанні з ПК знижує ризики.

4.1.3 Пожежна безпека.

1. Заборонено залишати пристрій у ввімкненому стані без нагляду.
2. Не допускається експлуатація при надмірному нагріванні або пошкодженні кабелів.
3. Комплекс не створює іскріння або відкритого вогню — класифікується як малонебезпечний.

4.1.4 Радіаційна та біологічна безпека.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

У пристрої відсутні джерела радіації, ультразвуку або лазерного випромінювання.

Робота з користувачем відбувається без прямого проникнення у тіло — метод повністю неінвазивний.

4.2 Основи охорони праці при проектуванні та розробці пристрою

4.2.1 Умови праці оператора.

Робоче місце повинно бути обладнане ергономічно: відповідна висота столу, правильне розташування монітора.

Рекомендована періодичність перерв: 10–15 хвилин щогодини.

Освітлення — не менше 300 лк, без сліпучого ефекту.

4.2.2 Робота з ПЕОМ.

Встановлення ПЕОМ відповідно до вимог ДСанПіН 3.3.2.007-98.

Забезпечення заземлення та фільтрації живлення для захисту від стрибків напруги.

Регулярна профілактика зорової втоми (вправи для очей, налаштування яскравості екрана).

4.2.3 Робота з мікроелектронікою.

Дотримання антистатичного захисту під час монтажу;

Вимірювання тестером рівнів живлення перед увімкненням плати;

Уникнення коротких замикань, правильне складання макета.

4.3 Висновки до розділу 4

У розробці програмно-апаратного комплексу враховано основні вимоги безпеки життєдіяльності та охорони праці:

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

- система є неінвазивною, низьковольтною, енергоощадною;
- використання акумуляторного живлення, захисту від перенапруг, антистатичних заходів забезпечує безпечну експлуатацію;
- організація робочого місця та дотримання гігієнічних норм дозволяє підтримувати високу продуктивність і мінімізувати ризики.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему «Програмно-апаратний комплекс для оцінки функціональних резервів серцево-судинної системи» було реалізовано повний інженерно-науковий цикл – від аналізу проблеми до практичної реалізації і тестування функціонального виробу.

У ході виконання роботи отримано наступні результати:

1. Проведено глибокий аналіз існуючих методів оцінки функціонального резерву серцево-судинної системи, визначено їх переваги та обмеження, обґрунтовано доцільність створення доступного, мобільного та інтелектуального рішення.

2. Розроблено архітектуру програмно-апаратного комплексу, що базується на мікроконтролері ESP32, сенсорах пульсу (MAX30102) та шкірно-гальванічної реакції (GSR), з реалізацією алгоритмів обробки сигналів у середовищі MATLAB.

3. Запропоновано математичну модель оцінки функціонального резерву з використанням індексу Руф'є, HRV-параметрів (SDNN, RMSSD), а також темпу відновлення після фізичного навантаження.

4. Розроблено алгоритмічне забезпечення, яке забезпечує збирання даних, обробку, класифікацію резерву та виведення результатів у вигляді інформативної візуалізації.

5. Виконано тестування системи на модельних і реальних сигналах. Результати підтвердили коректність роботи комплексу, відповідність фізіологічним реакціям, а також стабільність обробки сигналів.

6. Проаналізовано аспекти безпеки та охорони праці, що гарантує безпечну експлуатацію комплексу в навчальних, клінічних та побутових умовах.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

Практичне значення роботи полягає у створенні прототипу системи, здатної проводити неінвазивну оцінку стану серцево-судинної системи, з можливістю адаптації для телемедичних, реабілітаційних або спортивних потреб.

Подальші перспективи — розширення кількості сенсорів (АТ, SpO₂), застосування машинного навчання для автоматичної класифікації стану, інтеграція з мобільними платформами.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хвостівський М.О., Яворська Є.Б., Дозорський В.Г. Методичні рекомендації до виконання, оформлення та захисту кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 163 «Біомедична інженерія» / уклад.: Хвостівський М.О., Яворська Є.Б., Дозорський В.Г. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 57 с.
2. Попов В.В., Гоголь А.В. Біоелектричні сигнали: основи аналізу та інтерпретації. — Київ: Наук. думка, 2020. — 276 с.
3. Сидоренко С.О., Чекман І.С. Фізіологія людини. — Вінниця: Нова книга, 2018. — 488 с.
4. Malik M. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. // Circulation. — 1996. — Vol. 93(5). — P. 1043–1065.
5. MATLAB Documentation. Signal Processing Toolbox [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/signal/>
6. Arduino Project Hub. Interfacing MAX30102 with ESP32 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://create.arduino.cc/projecthub>
7. PhysioNet. MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://physionet.org>
8. Kubios HRV software — Scientific HRV analysis [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.kubios.com/>
9. Гуменюк В.М., Головач І.В. Основи біомедичної інженерії. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. — 264 с.
10. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з персональними комп'ютерами. — Київ, 1998.
11. ДСТУ 2223-93. Електробезпека. Терміни та визначення. — Київ: Держстандарт України, 1993.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

12. Яворська Є.Б. Математичні моделі та методи опрацювання ритмокардіосигналів для визначення характеристик серцевої ритміки з прогнозованою вірогідністю : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 / Євгенія Богданівна Яворська. — Тернопіль : ТНТУ, 2009. — 154 с.

13. Яворська Є.Б., Каплунова А.С. Алгоритм подавлення завад в електрокардіосигналах // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ» (м. Тернопіль, 7-8 грудня 2022 р.).

14. Математичне та комп'ютерне моделювання електрокардіосигналів у системах голтерівського моніторингу / Л.Є. Дедів, А.С. Сверстюк, І.Ю. Дедів, М.О. Хвостівський, В.Г. Дозорський, Є.Б. Яворська. – Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. – 120 с.

15. Дунець В.Л., Хвостівський М.О., Сверстюк А.С., Хвостівська Л.В. Математичне та алгоритмічно-програмне забезпечення опрацювання електрокардіосигналів при фізичному навантаженні у кардіодіагностичних системах: наукова монографія. Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2022. 136 с.

16. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної бо та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

Додатки

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

Код обробки сигналів у середовищі MATLAB

```

%% Імпорт PPG сигналу
data = load('ppg_data.txt');    % Текстовий файл з сигналом
fs = 100;                       % Частота дискретизації, Гц
t = (0:length(data)-1)/fs;     % Вісь часу

%% Фільтрація сигналу
[b,a] = butter(3, [0.5 5]/(fs/2), 'bandpass'); % ППФ 3-го
порядку
ppg_filt = filtfilt(b, a, data);

%% Виявлення піків (серцевих імпульсів)
[peaks, locs] = findpeaks(ppg_filt, 'MinPeakDistance',
round(0.5*fs));

RR_intervals = diff(locs) / fs; % Інтервали RR у секундах
HR = 60 ./ RR_intervals;        % Частота серцевих скорочень

%% Варіабельність серцевого ритму (HRV)
SDNN = std(RR_intervals);
RMSSD = sqrt(mean(diff(RR_intervals).^2));

%% Індекс Руф'є
% Наприклад, взяті усереднені значення:
P1 = mean(HR(1:5));            % ЧСС у спокої
P2 = mean(HR(6:10));           % ЧСС після навантаження
P3 = mean(HR(11:15));          % ЧСС через 1 хвилину
IR = ((P1 + P2 + P3) - 200)/10;

%% Класифікація резерву
if IR < 5 && SDNN > 50
    result = 'Високий функціональний резерв';
elseif IR <= 10 && SDNN >= 30
    result = 'Середній функціональний резерв';

```

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		


```

else
    result = 'Знижений функціональний резерв';
end

%% Виведення результатів
fprintf('Індекс Руф'є: %.2f\n', IR);
fprintf('SDNN: %.2f мс\n', SDNN);
fprintf('RMSSD: %.2f мс\n', RMSSD);
fprintf('Результат: %s\n', result);

%% Побудова графіка
figure;
plot(t, ppg_filt); hold on;
plot(locs/fs, ppg_filt(locs), 'ro');
xlabel('Час, с'); ylabel('Амплітуда');
title('Фільтрований PPG сигнал з виявленими піками');
grid on;

```

Цей код дозволяє обробити PPG-сигнал, виявити серцеві цикли, обчислити HRV-показники та інтерпретувати рівень функціонального резерву за індексом Руф'є.

					КРБ.163.21-058.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		