

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

Прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Біотехнічних систем

(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Програмно-апаратний комплекс аналізу ритміки серця  
з використанням методів машинного навчання

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи РБ-41  
спеціальності 163 Біомедична інженерія

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Каськів А.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Яворська Є.Б.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Хвостівський М.О.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Яворська Є.Б.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2026

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)  
« » 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 163 Біомедична інженерія  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Каськів Аліні Петрівні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Програмно-апаратний комплекс аналізу ритміки серця  
з використанням методів машинного навчання

Керівник роботи Яворська Євгенія Богданівна, к.т.н., доц.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 31 » грудня 2025 року № 4/7-1168

2. Термін подання студентом завершеної роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи електрокардіографічні сигнали бази даних MIT-BIH Arrhythmia Database; алгоритм Pan-Tompkins для виявлення QRS-комплексів; показники BCP;

методи машинного навчання для класифікації функціонального стану серцево-судинної системи

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



## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Програмно-апаратний комплекс аналізу ритміки серця з використанням методів машинного навчання». Кваліфікаційна робота бакалавра // Каськів Аліна Петрівна // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, група РБ-41 // Тернопіль, 2026 // с. – 88, рис. – 25, табл. – 16, бібліогр. – , додат. –

Ключові слова: ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАМА, РИТМІКА СЕРЦЯ, ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ СЕРЦЕВОГО РИТМУ, ЕКГ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, RANDOM FOREST, PAN–TOMPKINS, БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ, КАРДІОМОНІТОРИНГ, MATLAB.

У кваліфікаційній роботі розроблено програмно-апаратний комплекс аналізу ритміки серця з використанням методів машинного навчання, призначений для автоматизованої обробки електрокардіографічних сигналів та оцінювання функціонального стану серцево-судинної системи.

У роботі проведено аналіз сучасних методів реєстрації та обробки електрокардіографічних сигналів, досліджено існуючі підходи до автоматизованого аналізу серцевого ритму та використання методів машинного навчання в кардіологічних інформаційних системах. Обґрунтовано структуру програмно-апаратного комплексу, виконано вибір технічних засобів та розроблено математичне, алгоритмічне й програмне забезпечення системи.

Для цифрової обробки електрокардіографічних сигналів використано алгоритм Pan–Tompkins, що забезпечує автоматичне виявлення QRS-комплексів. На основі послідовностей RR-інтервалів здійснюється розрахунок показників варіабельності серцевого ритму та формування діагностичних ознак. Для класифікації функціонального стану серця використано алгоритм Random Forest. Програмну реалізацію комплексу виконано в середовищі MATLAB R2014a.

Результати проведених досліджень підтвердили ефективність запропонованого підходу до аналізу ритміки серця. Розроблений комплекс забезпечує автоматизовану обробку електрокардіографічних сигналів, високу точність виявлення QRS-комплексів та ефективну класифікацію функціонального стану серцево-судинної системи. Отримані результати можуть бути використані у системах кардіомоніторингу, функціональної діагностики та медичних інформаційних системах.

## ANNOTATION

Qualification Thesis Topic: Software–Hardware System for Heart Rate Dynamics Analysis Using Machine Learning Methods. Bachelor’s Qualification Work // Alina Petrivna Kaskiv // Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Group RB-41 // Ternopil, 2026 // pp. – 88, figs. – 25, tables – 16, refs. – \_\_\_\_, appendices – \_\_\_\_.

Keywords: ELECTROCARDIOGRAM, HEART RHYTHM, HEART RATE VARIABILITY, ECG, MACHINE LEARNING, RANDOM FOREST, PAN–TOMPKINS, BIOMEDICAL ENGINEERING, CARDIAC MONITORING, MATLAB.

The qualification thesis is devoted to the development of a software and hardware complex for heart rhythm analysis using machine learning methods intended for automated processing of electrocardiographic signals and assessment of the functional state of the cardiovascular system.

The thesis presents an analysis of modern methods for electrocardiographic signal acquisition and processing, investigates existing approaches to automated heart rhythm analysis, and examines the application of machine learning techniques in cardiological information systems. The structure of the proposed software and hardware complex is substantiated, and the technical, mathematical, algorithmic, and software support of the system is developed.

The Pan–Tompkins algorithm is employed for digital processing of electrocardiographic signals, providing automatic detection of QRS complexes. Based on RR interval sequences, heart rate variability parameters are calculated and diagnostic features are extracted. The Random Forest algorithm is applied to classify the functional state of the heart. The software implementation of the complex was developed using MATLAB R2014a.

The obtained research results confirmed the effectiveness of the proposed approach to heart rhythm analysis. The developed complex provides automated

processing of electrocardiographic signals, high accuracy of QRS complex detection, and efficient classification of the functional state of the cardiovascular system. The proposed solution can be applied in cardiac monitoring systems, functional diagnostics, and medical information systems.

# ЗМІСТ

## ВСТУП

### РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА 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

### РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

- 2.1 Розроблення структури програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця
- 2.2 Розроблення математичного забезпечення аналізу електрокардіографічних сигналів
- 2.3 Алгоритмічне забезпечення комплексу
- 2.4 Проєктування комплексу
- 2.5 Тестування роботи комплексу
- 2.6 Висновки до розділу 2

### РОЗДІЛ 3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

- 3.1 Обґрунтування вибору програмного середовища для розв'язання поставленого завдання
- 3.2 Методика проведення медико-біологічного дослідження
- 3.3 Результати медико-біологічного дослідження та їх аналіз
- 3.4 Висновки до розділу 3

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ			
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	Програмно-апаратний комплекс аналізу ритміки серця з використанням методів машинного навчання Пояснювальна записка	<i>Літ</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		Каськів А.П.						
<i>Перев.</i>		Яворська Є.Б.						
<i>Н.конт</i>		Хвостівський М.С.						
<i>Зав.каф</i>		Яворська Є.Б.						
						ТНТУ, каф. БТ гр. РБ-41		

РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ  
ПРАЦІ

4.1 Безпека життєдіяльності

4.2 Основи охорони праці

4.3 Висновки до розділу 4

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

ДОДАТКИ

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Серцево-судинні захворювання залишаються однією з найактуальніших медико-соціальних проблем сучасності та посідають провідне місце серед причин смертності населення у світі [13]. Важливим фактором, що визначає ефективність профілактики, лікування та реабілітації пацієнтів із серцево-судинними патологіями, є своєчасне виявлення порушень серцевого ритму. Аритмії можуть виникати внаслідок функціональних або органічних змін серця та нерідко є передвісниками тяжких ускладнень, зокрема серцевої недостатності, інсульту або раптової серцевої смерті [14]. Тому розроблення сучасних засобів автоматизованого аналізу ритміки серця є важливим напрямом розвитку біомедичної інженерії та медичних інформаційних технологій.

Одним із найбільш поширених методів оцінювання функціонального стану серцево-судинної системи є електрокардіографія, яка забезпечує реєстрацію електричної активності серця та дозволяє отримувати об'єктивну інформацію про особливості його роботи [1, 2]. Сучасні цифрові електрокардіографічні системи здатні накопичувати значні обсяги даних тривалого моніторингу, що створює передумови для детального дослідження серцевого ритму та виявлення патологічних змін на ранніх стадіях їх розвитку [10, 12]. Водночас аналіз великих масивів електрокардіографічних даних вимагає значних часових затрат та високої кваліфікації медичного персоналу, що обмежує ефективність традиційних підходів до діагностики.

Суттєвий розвиток методів цифрової обробки біомедичних сигналів сприяв створенню нових підходів до автоматизованого аналізу електрокардіограм. Значний внесок у розвиток теоретичних та практичних засад оброблення біомедичних сигналів зробили українські науковці С. М. Злепко, С. В. Павлов, Л. С. Файнзільберг, В. Г. Абакумов, Г. С. Тимчик та інші дослідники [1–8]. Запропоновані ними методи аналізу сигналів, математичного моделювання та комп'ютерної діагностики стали основою для

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

створення сучасних медичних інформаційно-вимірювальних систем і програмно-апаратних комплексів функціональної діагностики.

Останніми роками особливого поширення набули методи машинного навчання, які дозволяють автоматично виявляти приховані закономірності в біомедичних даних та виконувати класифікацію функціональних станів із високою точністю [22–25]. Використання алгоритмів машинного навчання в задачах аналізу електрокардіографічних сигналів дає можливість автоматизувати процес виявлення аритмій, оцінювання показників варіабельності серцевого ритму та підтримки прийняття діагностичних рішень [17–21]. Результати сучасних досліджень демонструють, що точність класифікації серцевих порушень із застосуванням нейронних мереж та інших інтелектуальних методів досягає рівня, співставного з результатами аналізу, виконаного кваліфікованим лікарем-кардіологом [17, 18].

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень у сфері аналізу електрокардіографічних сигналів, актуальною залишається задача створення доступних програмно-апаратних комплексів, які забезпечують комплексну обробку сигналів електрокардіограми, автоматичне виділення інформативних ознак серцевого ритму та використання методів машинного навчання для підвищення достовірності діагностичних результатів. Особливої уваги потребує інтеграція засобів реєстрації біомедичних сигналів із програмними модулями аналізу та інтелектуальної підтримки прийняття рішень у межах єдиної інформаційно-вимірювальної системи.

Актуальність роботи полягає у необхідності підвищення ефективності аналізу ритміки серця шляхом застосування сучасних методів машинного навчання в складі програмно-апаратного комплексу для автоматизованої обробки електрокардіографічних сигналів та виявлення порушень серцевого ритму.

**Метою роботи** є розроблення програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця з використанням методів машинного навчання для

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

автоматизованої обробки електрокардіографічних сигналів та підвищення достовірності виявлення порушень серцевого ритму.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних методів і засобів дослідження серцевого ритму та виявлення аритмій;
- дослідити особливості застосування методів цифрової обробки електрокардіографічних сигналів;
- проаналізувати можливості використання алгоритмів машинного навчання для класифікації станів серцево-судинної системи;
- розробити структуру програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця;
- розробити математичне та алгоритмічне забезпечення обробки електрокардіографічних сигналів;
- реалізувати програмне забезпечення для автоматизованого аналізу показників серцевого ритму;
- провести тестування та оцінити ефективність функціонування розробленого комплексу.

**Об'єктом дослідження** є процеси реєстрації, цифрової обробки та аналізу електрокардіографічних сигналів для оцінювання ритмічної діяльності серця.

**Предметом дослідження** є методи та засоби аналізу ритміки серця на основі технологій цифрової обробки сигналів і машинного навчання.

**Методи дослідження** включають методи цифрової обробки біомедичних сигналів, статистичний аналіз, методи аналізу варіабельності серцевого ритму, алгоритми машинного навчання для класифікації електрокардіографічних даних, а також методи математичного моделювання та програмної реалізації біотехнічних систем.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у створенні програмно-апаратного комплексу, який забезпечує автоматизований аналіз

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

електрокардіографічних сигналів, розрахунок показників серцевого ритму та підтримку прийняття рішень щодо функціонального стану серцево-судинної системи. Результати роботи можуть бути використані під час розроблення медичних інформаційно-вимірювальних систем, засобів функціональної діагностики та систем дистанційного кардіомоніторингу.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

Ефективність сучасних систем функціональної діагностики значною мірою залежить від можливостей своєчасного виявлення та аналізу порушень серцевого ритму. Розвиток цифрових технологій, засобів реєстрації біомедичних сигналів та методів штучного інтелекту сприяв появі нових підходів до автоматизованого аналізу електрокардіографічних даних. Водночас велика кількість існуючих технічних рішень потребує систематизації та оцінювання їх ефективності з точки зору застосування у програмно-апаратних комплексах кардіодіагностики.

У цьому розділі проведено аналіз сучасних систем кардіомоніторингу, методів цифрової обробки електрокардіографічних сигналів, підходів до аналізу варіабельності серцевого ритму та алгоритмів машинного навчання, які використовуються для автоматизованого виявлення порушень серцевої діяльності. Особливу увагу приділено дослідженню існуючих методів аналізу ритміки серця, визначенню їх переваг та обмежень, а також обґрунтуванню доцільності застосування сучасних алгоритмів машинного навчання в складі програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця.

Результати проведеного аналізу є підґрунтям для формування вимог до структури, математичного та алгоритмічного забезпечення програмно-апаратного комплексу, розроблення якого розглядається в наступних розділах роботи.

### 1.1 Аналіз існуючих рішень поставленого завдання

Серцево-судинні захворювання є однією з основних причин смертності та інвалідизації населення у світі. За даними міжнародних досліджень, значна частка летальних випадків пов'язана з порушеннями електрофізіологічної активності серця, які супроводжуються виникненням аритмій різного

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

походження [13]. Своєчасне виявлення відхилень у роботі серцево-судинної системи є важливим завданням сучасної медицини, а одним із найбільш інформативних методів оцінювання функціонального стану серця залишається електрокардіографія [1, 10].

Електрокардіографія базується на реєстрації біоелектричних потенціалів, що виникають під час роботи серцевого м'яза. Аналіз форми електрокардіографічного сигналу, тривалості його характерних інтервалів та особливостей серцевого ритму дозволяє отримати інформацію про функціональний стан серця та наявність патологічних змін [11]. Традиційно оцінювання електрокардіограм здійснюється лікарем-кардіологом шляхом візуального аналізу записів ЕКГ, однак зі збільшенням тривалості моніторингу та кількості пацієнтів ефективність такого підходу знижується [12].

Для автоматизації процесу діагностики широко використовуються сучасні електрокардіографічні системи та програмно-апаратні комплекси аналізу серцевого ритму. До найбільш поширених рішень належать стаціонарні електрокардіографи, холтерівські системи моніторингу, мобільні кардіомонітори та телемедичні системи дистанційного контролю фізіологічних показників пацієнта [2, 4].

Як видно з рис. 1.1, сучасні системи кардіомоніторингу можна поділити на чотири основні групи.

Холтерівський моніторинг є одним із найефективніших методів тривалого спостереження за діяльністю серця. На відміну від стандартної електрокардіографії, яка реєструє сигнал протягом короткого часу, холтерівські системи забезпечують безперервний запис електрокардіограми протягом 24–72 годин і більше, що дозволяє виявляти епізодичні порушення серцевого ритму та оцінювати реакцію серцево-судинної системи на фізичні та емоційні навантаження [13, 14].

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Важливим напрямом розвитку кардіодіагностичних систем є використання методів цифрової обробки біомедичних сигналів. Основними завданнями обробки електрокардіографічних даних є пригнічення шумів, видалення артефактів руху, компенсація мережових завад та виділення інформативних діагностичних ознак [1, 2]. Для цього застосовуються цифрові фільтри, методи спектрального аналізу, вейвлет-перетворення та адаптивні алгоритми обробки сигналів [11, 12].

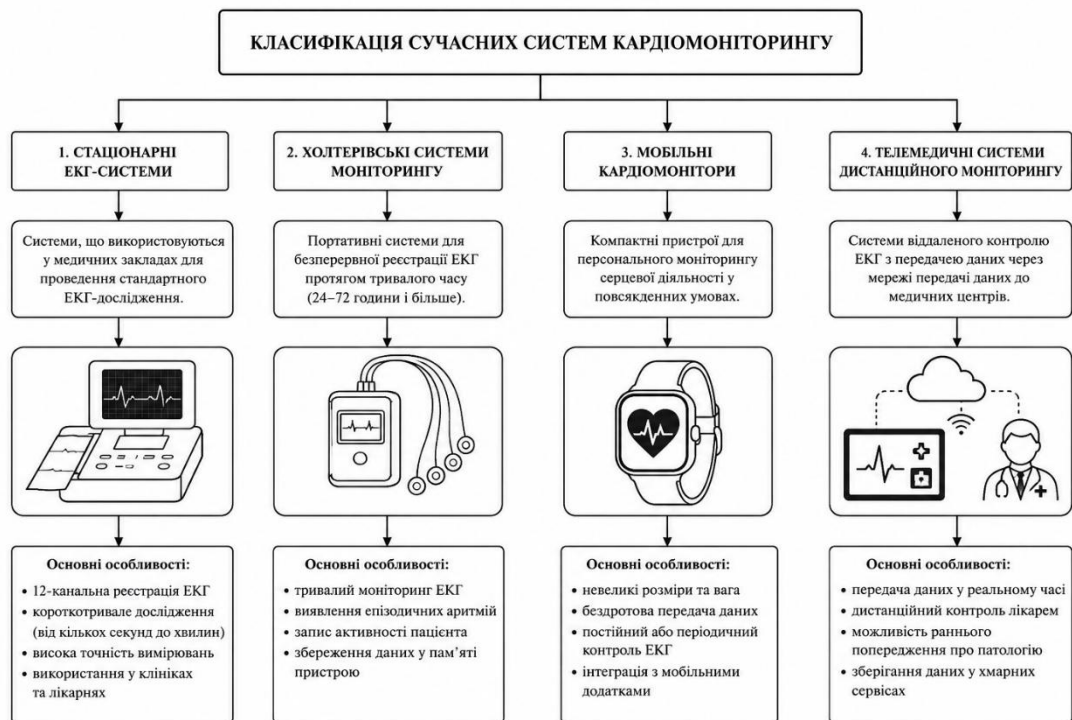


Рисунок 1.1 – Класифікація сучасних систем кардіомоніторингу

Одним із найбільш відомих алгоритмів автоматичного аналізу електрокардіографічних сигналів є алгоритм Pan–Tompkins, який забезпечує виявлення QRS-комплексів у режимі реального часу [9]. Алгоритм включає послідовність операцій фільтрації, диференціювання, піднесення до квадрату та інтегрування сигналу, що дозволяє ефективно виділяти моменти виникнення R-піків навіть за наявності шумових складових. Незважаючи на

значний термін використання, алгоритм залишається одним із базових підходів у сучасних системах аналізу ЕКГ [10].

Значна увага в сучасних дослідженнях приділяється аналізу варіабельності серцевого ритму (Heart Rate Variability, HRV), який є важливим показником функціонального стану вегетативної нервової системи та серцево-судинної системи загалом [13]. Для оцінювання варіабельності використовуються часові, геометричні та спектральні показники, серед яких найбільш поширеними є MeanRR, SDNN, RMSSD, LF, HF та LF/HF [13, 14]. Аналіз зазначених параметрів дозволяє оцінювати адаптаційні можливості організму та виявляти ризики розвитку серцево-судинних захворювань.

Важливу роль у розвитку сучасних кардіодіагностичних систем відіграє використання відкритих баз даних електрокардіографічних сигналів. Найбільш відомою є база даних MIT-BIH Arrhythmia Database, яка містить записи різноманітних типів аритмій і широко використовується для тестування алгоритмів автоматичного аналізу ЕКГ [16]. Доступ до зазначеної бази реалізовано через платформу PhysioNet, що є одним із найбільших світових ресурсів для дослідження фізіологічних сигналів [15].

Останніми роками значного поширення набули методи машинного навчання та штучного інтелекту для автоматизованої класифікації електрокардіографічних сигналів [22–25]. На відміну від традиційних алгоритмів, які використовують жорстко задані правила прийняття рішень, методи машинного навчання здатні самостійно знаходити приховані закономірності у великих масивах даних та формувати математичні моделі для прогнозування стану серцево-судинної системи.

Для аналізу ритміки серця використовуються різноманітні алгоритми класифікації, серед яких найбільш поширеними є метод опорних векторів (Support Vector Machine), дерева рішень (Decision Tree), випадковий ліс (Random Forest), метод k-найближчих сусідів (K-Nearest Neighbors) та штучні нейронні мережі [23–25]. Кожен із зазначених методів має власні переваги та

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

обмеження щодо швидкодії, точності класифікації та вимог до обсягу навчальної вибірки.

Найбільш перспективним напрямом сьогодні є використання глибоких нейронних мереж для автоматичного виявлення аритмій. У роботах Hannun та співавторів продемонстровано можливість досягнення точності класифікації, співставної з рівнем досвідчених кардіологів [17]. Подібні результати отримані також у дослідженнях Ribeiro та співавторів, де для аналізу 12-відведень електрокардіограми використовувались глибокі нейронні мережі, навчені на великому масиві клінічних даних [18]. Роботи Acharya та інших дослідників підтверджують високу ефективність згорткових нейронних мереж для автоматичного виявлення серцевих аритмій за електрокардіографічними сигналами [19].

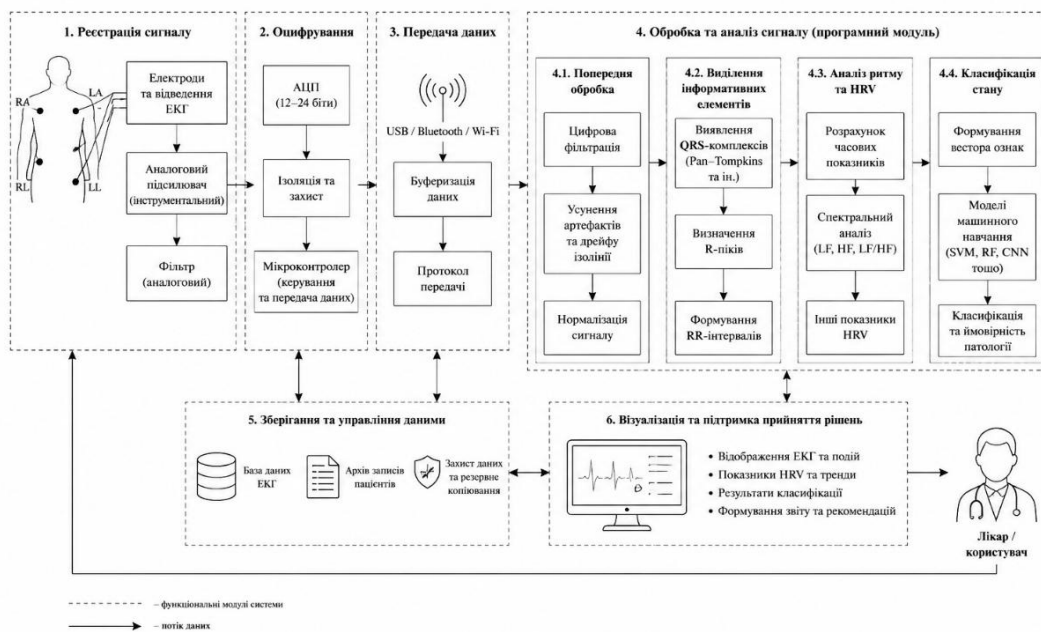


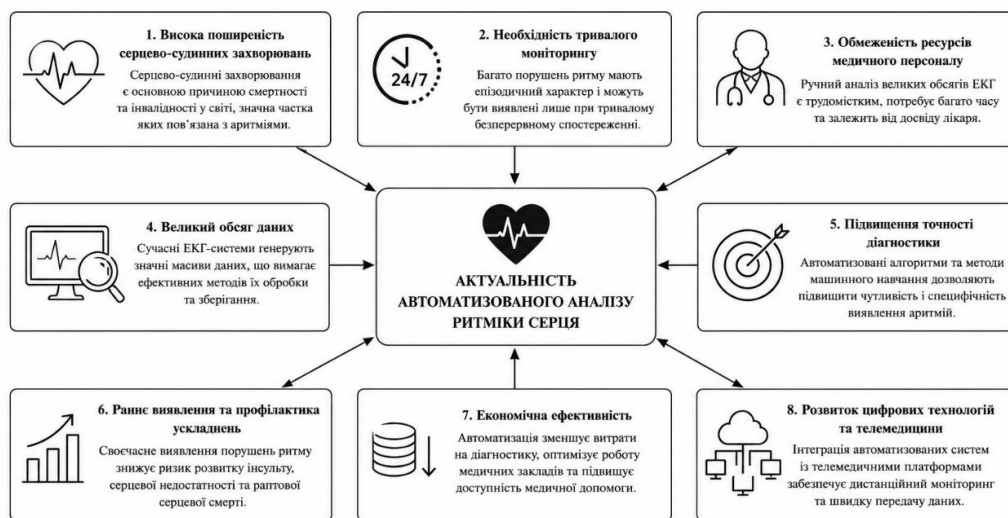
Рисунок 1.2 – Структура автоматизованої системи аналізу ЕКГ

Таким чином, проведений аналіз показав, що сучасні системи аналізу ритміки серця активно використовують методи цифрової обробки сигналів, аналіз варіабельності серцевого ритму та алгоритми машинного навчання. Разом із тим залишається актуальною задача створення програмно-апаратного

комплексу, який поєднуватиме засоби реєстрації електрокардіографічних сигналів, модулі цифрової обробки даних та інтелектуальні алгоритми класифікації в межах єдиної інформаційно-вимірювальної системи, орієнтованої на підвищення достовірності аналізу ритміки серця.

## 1.2 Актуальність виконання роботи

Серцево-судинні захворювання протягом останніх десятиліть залишаються однією з найважливіших медико-соціальних проблем людства. Вони посідають провідне місце серед причин смертності та інвалідизації населення як у розвинених країнах, так і в країнах, що розвиваються. Значна частина випадків передчасної смертності пов'язана з порушеннями діяльності серця, зокрема з різними формами аритмій, які можуть виникати без виражених клінічних симптомів і тривалий час залишатися непоміченими [13, 14].



Рисуюнок 1.3 – Основні чинники, що зумовлюють необхідність автоматизованого аналізу серцевого ритму

Ефективність лікування серцево-судинних захворювань значною мірою залежить від своєчасної діагностики порушень серцевого ритму. Найбільш



захворювань та ефективність лікувальних заходів [13, 14]. Водночас точне визначення параметрів варіабельності потребує якісної попередньої обробки сигналів та надійного виявлення характерних елементів електрокардіограми.

Подальший розвиток інформаційних технологій зумовив активне впровадження методів машинного навчання в медичну практику. На відміну від традиційних алгоритмів аналізу, які використовують заздалегідь визначені правила прийняття рішень, методи машинного навчання забезпечують автоматичне виявлення прихованих закономірностей у даних та формування моделей прогнозування на основі накопиченого досвіду [22–25]. Завдяки цьому значно підвищується точність класифікації електрокардіографічних сигналів та зменшується вплив суб'єктивного фактору під час постановки діагнозу.

Перспективність використання методів машинного навчання для аналізу серцевого ритму підтверджується результатами численних наукових досліджень. Використання згорткових нейронних мереж, рекурентних нейронних мереж та ансамблевих методів класифікації дозволяє досягати високих показників точності при автоматичному виявленні аритмій різних типів [17–21]. У низці досліджень показано, що ефективність сучасних алгоритмів штучного інтелекту є співставною з результатами аналізу, виконаного досвідченими кардіологами [17, 18].

Водночас значна частина існуючих програмних продуктів орієнтована виключно на програмну обробку даних і не враховує особливостей інтеграції із засобами реєстрації біомедичних сигналів. Крім того, багато сучасних рішень є комерційними продуктами з обмеженим доступом до алгоритмів аналізу, що ускладнює їх адаптацію для наукових досліджень та навчальних цілей. У зв'язку з цим актуальною залишається задача створення програмно-апаратного комплексу, який забезпечуватиме повний цикл роботи з електрокардіографічними сигналами – від реєстрації та попередньої обробки

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

до автоматизованої класифікації функціонального стану серця за допомогою методів машинного навчання.

Таким чином, актуальність роботи обумовлена необхідністю розроблення сучасного програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця, який поєднуватиме засоби реєстрації електрокардіографічних сигналів, алгоритми цифрової обробки даних, методи аналізу варіабельності серцевого ритму та інструменти машинного навчання для підвищення достовірності виявлення порушень серцевого ритму і підтримки прийняття діагностичних рішень у медичних інформаційно-вимірювальних системах.

### **1.3 Методи, способи та шляхи вирішення поставленої задачі**

Розвиток сучасних інформаційних технологій та засобів біомедичної інженерії сприяв появі нових підходів до автоматизованого аналізу електрокардіографічних сигналів. Для вирішення задачі дослідження ритміки серця застосовуються методи цифрової обробки сигналів, математичного аналізу, статистичної обробки даних та алгоритми машинного навчання. Комплексне використання зазначених методів дозволяє підвищити достовірність діагностики порушень серцевого ритму та забезпечити автоматизацію процесу прийняття рішень [1, 2, 11].

Основним джерелом інформації про функціональний стан серця є електрокардіографічний сигнал, який являє собою сукупність біоелектричних потенціалів, що виникають під час деполяризації та реполяризації міокарда [10]. Реєстрація електрокардіограми супроводжується впливом різноманітних завад, серед яких найбільш поширеними є високочастотний шум електронних компонентів, мережеві перешкоди промислової частоти, артефакти руху пацієнта та дрейф ізоляції [11, 12]. Тому першим етапом аналізу ритміки серця є попередня обробка сигналу.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		



піднесення сигналу до квадрату та ковзного інтегрування, що забезпечує високу точність виявлення QRS-комплексів навіть за наявності шумів.

На основі визначених моментів появи R-піків формується послідовність RR-інтервалів, яка є основою для оцінювання варіабельності серцевого ритму [13]. Варіабельність серцевого ритму характеризує зміни тривалості інтервалів між сусідніми серцевими скороченнями та використовується для оцінювання функціонального стану серцево-судинної і вегетативної нервової систем [14].

Для аналізу варіабельності серцевого ритму використовуються часові та спектральні методи дослідження. До найбільш поширених часових показників належать середнє значення RR-інтервалів (MeanRR), стандартне відхилення послідовності RR-інтервалів (SDNN), квадратний корінь із середнього квадрата різниць між сусідніми RR-інтервалами (RMSSD) та відсоток інтервалів, різниця між якими перевищує 50 мс (pNN50) [13]. Зазначені параметри дозволяють оцінювати рівень активності автономної нервової системи та адаптаційні можливості організму.

Спектральний аналіз базується на визначенні розподілу потужності сигналу варіабельності серцевого ритму в різних частотних діапазонах [14]. Найчастіше досліджуються низькочастотна складова LF (Low Frequency), високочастотна складова HF (High Frequency) та їх співвідношення LF/HF. Отримані показники використовуються для оцінювання симпатичної та парасимпатичної регуляції серцевої діяльності [13].

Одним із перспективних напрямів розвитку сучасних систем аналізу серцевого ритму є застосування методів машинного навчання. Використання інтелектуальних алгоритмів дозволяє автоматизувати процес класифікації електрокардіографічних сигналів та виявлення патологічних станів серцево-судинної системи [22–25].

Класичні методи машинного навчання передбачають формування набору інформативних ознак на основі параметрів електрокардіограми та показників варіабельності серцевого ритму. Як вхідні дані можуть

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

використовуватися часові параметри сигналу, спектральні характеристики, статистичні показники та морфологічні особливості електрокардіографічної кривої [23, 24].

Серед найбільш поширених алгоритмів класифікації слід виділити метод опорних векторів (Support Vector Machine), дерева рішень (Decision Tree), випадковий ліс (Random Forest) та метод k-найближчих сусідів (K-Nearest Neighbors) [23–25]. Дані алгоритми характеризуються відносно невисокими вимогами до обчислювальних ресурсів і можуть ефективно використовуватися в програмно-апаратних комплексах реального часу.

Особливе місце в сучасних дослідженнях займають штучні нейронні мережі та методи глибокого навчання. На відміну від класичних алгоритмів, нейронні мережі здатні автоматично формувати ознаки на основі вхідних даних без необхідності їх попереднього ручного визначення [22]. Застосування згорткових нейронних мереж (Convolutional Neural Networks, CNN) дозволяє безпосередньо аналізувати електрокардіографічні сигнали та виконувати автоматичну класифікацію різних типів аритмій [17–19].

Результати сучасних досліджень демонструють високу ефективність використання методів глибокого навчання для аналізу електрокардіограм. Зокрема, у роботах Hannun та співавторів, а також Ribeiro та співавторів показано, що нейронні мережі забезпечують точність класифікації порушень серцевого ритму, співставну з рівнем професійних кардіологів [17, 18]. Це свідчить про перспективність застосування технологій штучного інтелекту в системах підтримки прийняття діагностичних рішень.

Для навчання та тестування алгоритмів машинного навчання широко використовуються спеціалізовані бази біомедичних даних. Найбільш відомими є ресурси PhysioNet та MIT-BIH Arrhythmia Database, які містять значні обсяги електрокардіографічних записів із різними типами серцевих аритмій [15, 16]. Використання зазначених баз даних дозволяє проводити об'єктивне оцінювання ефективності алгоритмів аналізу серцевого ритму та

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		



## 1.4 Висновки до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз сучасного стану проблеми автоматизованого аналізу ритміки серця та досліджено існуючі підходи до обробки електрокардіографічних сигналів. Встановлено, що серцево-судинні захворювання залишаються однією з основних причин смертності населення, а своєчасне виявлення порушень серцевого ритму є важливим завданням сучасної медицини та біомедичної інженерії.

Виконаний огляд науково-технічної літератури показав, що для оцінювання функціонального стану серцево-судинної системи найбільш широко використовується електрокардіографія, яка забезпечує отримання об'єктивної інформації про електричну активність серця. Проаналізовано основні типи сучасних систем кардіомоніторингу, серед яких стаціонарні електрокардіографічні комплекси, холтерівські системи моніторингу, мобільні кардіомонітори та телемедичні системи дистанційного спостереження за пацієнтами.

У результаті аналізу встановлено, що ефективність сучасних кардіодіагностичних систем значною мірою залежить від якості цифрової обробки електрокардіографічних сигналів. Розглянуто основні методи попередньої обробки ЕКГ, виявлення QRS-комплексів та формування послідовності RR-інтервалів, які є базою для подальшого аналізу варіабельності серцевого ритму. Особливу увагу приділено алгоритму Pan-Tompkins як одному з найбільш поширених методів автоматичного визначення характерних елементів електрокардіограми.

Проведене дослідження показало, що аналіз варіабельності серцевого ритму є ефективним інструментом оцінювання функціонального стану серцево-судинної та вегетативної нервової систем. Визначено основні часові та спектральні показники, які використовуються для кількісної оцінки

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

серцевого ритму та можуть бути застосовані як інформативні ознаки для автоматизованої класифікації стану пацієнта.

На підставі аналізу сучасних наукових публікацій встановлено, що одним із найбільш перспективних напрямів розвитку кардіодіагностичних систем є використання методів машинного навчання та штучного інтелекту. Використання алгоритмів класифікації дозволяє автоматизувати процес аналізу електрокардіографічних сигналів, підвищити достовірність виявлення аритмій та зменшити вплив людського фактора на результати діагностики. Особливо високу ефективність демонструють нейронні мережі та інші методи глибокого навчання, які забезпечують точність аналізу, співставну з рівнем кваліфікованих медичних фахівців.

Таким чином, результати проведеного аналізу підтверджують доцільність розроблення програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця з використанням методів машинного навчання. Для підвищення ефективності аналізу серцевого ритму доцільно реалізувати комплексний підхід, який поєднує засоби реєстрації електрокардіографічних сигналів, методи цифрової обробки даних, розрахунок показників варіабельності серцевого ритму та алгоритми машинного навчання для автоматизованої класифікації функціонального стану серцево-судинної системи. Отримані результати стали підґрунтям для виконання проектної частини роботи, присвяченої розробленню структури, математичного забезпечення та програмно-апаратної реалізації запропонованого комплексу.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2

### ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

У результаті аналізу сучасних методів та засобів дослідження серцевого ритму встановлено доцільність створення програмно-апаратного комплексу, який поєднує засоби реєстрації електрокардіографічних сигналів, модулі цифрової обробки даних та алгоритми машинного навчання для автоматизованого аналізу ритміки серця. Запропонований комплекс призначений для реєстрації електрокардіографічних сигналів, виділення інформативних ознак серцевого ритму, оцінювання показників варіабельності серцевого ритму та класифікації функціонального стану серцево-судинної системи.

У цьому розділі наведено обґрунтування вибору технічного забезпечення комплексу, розроблено математичне та алгоритмічне забезпечення обробки електрокардіографічних сигналів, описано структуру програмно-апаратної реалізації системи та результати її тестування.

#### 2.1 Розроблення структури програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця

##### 2.1.1 Обґрунтування вибору структури комплексу

Для реалізації програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця необхідно забезпечити виконання таких функцій:

- реєстрація електрокардіографічних сигналів;
- попередня аналогова обробка сигналу;
- аналого-цифрове перетворення;
- передача даних до обчислювального модуля;
- цифрова обробка сигналу;
- аналіз показників серцевого ритму;
- класифікація функціонального стану серця;

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

– відображення результатів користувачу.

З урахуванням зазначених вимог запропоновано структуру програмно-апаратного комплексу, що складається з вимірювального модуля, модуля збору даних, програмного модуля аналізу та модуля візуалізації результатів.

### 2.1.2 Структура програмно-апаратного комплексу

До складу комплексу входять:

1. Вимірювальний модуль, який призначений для реєстрації електрокардіографічного сигналу. Він складається з:

- електродів ЕКГ;
- інструментального підсилювача;
- аналогового фільтра.

2. Модуль збору та передачі даних, який складається з:

- аналого-цифрового перетворювача;
- мікроконтролера;
- інтерфейсу передачі даних.

3. Програмний модуль, який виконує:

- фільтрацію сигналів;
- виявлення QRS-комплексів;
- розрахунок HRV;
- машинне навчання;
- формування висновків.

4. Модуль візуалізації, який забезпечує:

- відображення ЕКГ;
- відображення параметрів HRV;
- результати класифікації.

Структурну схему програмно-апаратного комплексу наведено на рис. 2.1.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

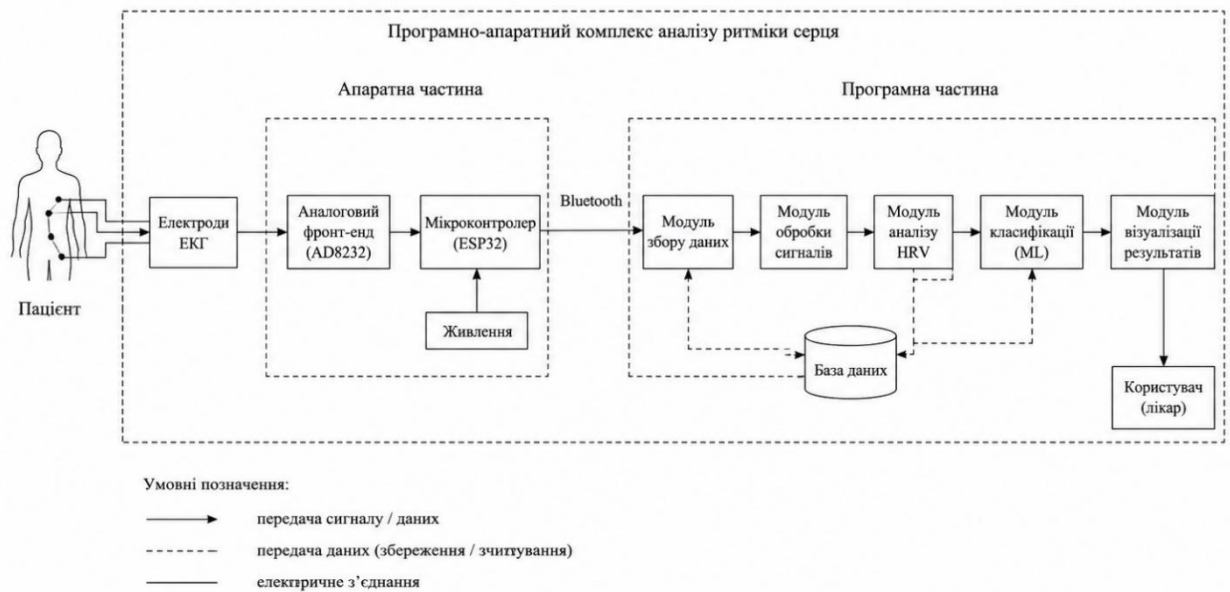


Рисунок 2.1 – Структурна схема програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця

### 2.1.3 Обґрунтування вибору елементної бази

Для реєстрації електрокардіографічного сигналу доцільно використовувати спеціалізований модуль AD8232.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики модуля

Параметр	Значення
Напруга живлення	3,3 В
Споживаний струм	170 мкА
Кількість каналів	1
Робоча смуга	0,5–40 Гц

Для збору даних пропонується використання мікроконтролера ESP32.

Переваги: висока продуктивність, підтримка Bluetooth, підтримка Wi-Fi, низьке енергоспоживання.

Стосовно характеристик основних складових комплексу, то вони представлені у табл. 2.2.



мікроконтролера ESP32 дозволяє забезпечити необхідні функціональні характеристики комплексу при невисокій вартості та можливості подальшого розширення функціоналу. Запропонована структура створює основу для реалізації математичного та алгоритмічного забезпечення аналізу серцевого ритму, що розглядається в наступному підрозділі.

## 2.2 Розроблення математичного забезпечення аналізу електрокардіографічних сигналів

Математичне забезпечення програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця визначає методи подання, обробки та аналізу електрокардіографічних сигналів, а також алгоритми формування діагностичних ознак для подальшої класифікації функціонального стану серцево-судинної системи. Основним завданням математичного забезпечення є забезпечення достовірного виділення інформативних параметрів серцевого ритму та підвищення точності автоматизованого виявлення порушень ритмічної діяльності серця.

У розробленому програмно-апаратному комплексі математичне забезпечення включає математичну модель електрокардіографічного сигналу, методи визначення RR-інтервалів, розрахунок показників варіабельності серцевого ритму та формування вектора ознак для алгоритмів машинного навчання.

### 2.2.1 Математична модель електрокардіографічного сигналу

Електрокардіографічний сигнал, зареєстрований із поверхні тіла людини, являє собою сукупність корисного сигналу та шумових складових, що виникають під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів. Загальну математичну модель сигналу можна представити у вигляді:

$$x(t) = s(t) + n(t), \quad (2.1)$$

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		



### 2.2.2 Визначення RR-інтервалів

Основою аналізу серцевого ритму є визначення послідовності RR-інтервалів, що являють собою часові проміжки між сусідніми R-піками електрокардіограми.

Тривалість RR-інтервалу визначається співвідношенням:

$$RR_i = t_{i+1} - t_i, \quad (2.3)$$

де:  $t_i$  – момент виникнення поточного R-піка;

$t_{i+1}$  – момент виникнення наступного R-піка.

На основі отриманої послідовності RR-інтервалів формується часовий ряд, який використовується для оцінювання варіабельності серцевого ритму.

### 2.2.3 Розрахунок часових показників варіабельності серцевого ритму

Одним із найбільш інформативних показників є середнє значення RR-інтервалів:

$$MeanRR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RR_i, \quad (2.4)$$

де  $N$  – кількість інтервалів.

Стандартне відхилення послідовності RR-інтервалів визначається як:

$$SDNN = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RR_i - \overline{RR})^2}{N - 1}}, \quad (2.5)$$

де  $\overline{RR}$  – середнє значення RR-інтервалів.

Показник RMSSD обчислюється за формулою:

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

$$RMSSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RR_{i+1} - RR_i)^2}{N-1}}, \quad (2.6)$$

де  $RR_{i+1}$  та  $RR_i$  – сусідні RR-інтервали.

Зазначені параметри використовуються для оцінювання активності автономної нервової системи та формують основу для автоматизованого аналізу серцевого ритму [13].

#### 2.2.4 Спектральний аналіз серцевого ритму

Для оцінювання регуляторних механізмів серцевої діяльності використовується спектральний аналіз послідовності RR-інтервалів.

Потужність спектра сигналу визначається як:

$$P(f) = |X(f)|^2, \quad (2.7)$$

де  $X(f)$  – спектральне представлення сигналу;

$P(f)$  – спектральна потужність.

У процесі аналізу визначаються:  $LF$  (0,04–0,15 Гц),  $HF$  (0,15–0,40 Гц),  $LF/HF$ .

Співвідношення  $LF/HF$  розраховується за формулою:

$$K_{LF/HF} = \frac{LF}{HF}, \quad (2.8)$$

Даний показник характеризує баланс між симпатичним та парасимпатичним відділами автономної нервової системи [13, 14].

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

### 2.2.5 Формування вектора ознак для машинного навчання

Для автоматизованої класифікації функціонального стану серця формується вектор ознак:

$$X = \{MeanRR, SDNN, RMSSD, LF, HF, LF / HF\}, \quad (2.9)$$

де кожен елемент характеризує певний аспект функціонування серцево-судинної системи.

Перед подачею до класифікатора виконується нормалізація ознак:

$$x'_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}, \quad (2.10)$$

де  $\mu$  – середнє значення ознаки;

$\sigma$  – стандартне відхилення.

Нормалізація дозволяє усунути вплив різних масштабів даних та підвищити ефективність навчання моделі [22–25].

### 2.2.6 Математична модель класифікації стану серця

У розробленому комплексі класифікація виконується на основі алгоритмів машинного навчання.

Функція класифікатора має вигляд:

$$y = f(X), \quad (2.11)$$

де  $X$  – вектор ознак;

$f(X)$  – модель машинного навчання;

$y$  – результат класифікації.

У найпростішому випадку:

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		



## 2.3 Алгоритмічне забезпечення комплексу

Алгоритмічне забезпечення програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця визначає послідовність обробки електрокардіографічних сигналів від моменту їх реєстрації до отримання результатів автоматизованої оцінки функціонального стану серцево-судинної системи. Основним завданням алгоритмічного забезпечення є реалізація процедур цифрової обробки сигналів, розрахунку показників варіабельності серцевого ритму та класифікації стану пацієнта за допомогою методів машинного навчання.

Запропонований алгоритм забезпечує автоматизовану обробку даних у режимі реального часу та дозволяє мінімізувати вплив людського фактору на результати аналізу.

### 2.3.1 Загальна структура алгоритму функціонування комплексу

Робота програмно-апаратного комплексу включає такі основні етапи:

1. Реєстрація електрокардіографічного сигналу.
2. Попередня цифрова фільтрація сигналу.
3. Виявлення QRS-комплексів.
4. Формування послідовності RR-інтервалів.
5. Розрахунок показників варіабельності серцевого ритму.
6. Формування вектора діагностичних ознак.
7. Класифікація функціонального стану серця.
8. Відображення результатів аналізу.

Загальний алгоритм роботи комплексу наведено на рис. 2.4.

### 2.3.2 Алгоритм попередньої обробки електрокардіографічного сигналу

Якість аналізу серцевого ритму безпосередньо залежить від якості вхідного сигналу. Під час реєстрації електрокардіограми виникають

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

різноманітні шуми та артефакти, які можуть призводити до помилок під час визначення характерних елементів сигналу.

Попередня обробка включає:

- видалення дрейфу ізолінії;
- пригнічення високочастотних шумів;
- усунення мережевих завад;
- нормалізацію сигналу.

Для реалізації фільтрації використовується цифровий смуговий фільтр із робочим діапазоном частот 0,5–40 Гц, який забезпечує збереження корисної інформації електрокардіографічного сигналу та одночасне зменшення впливу зовнішніх завад.

Після фільтрації виконується нормалізація амплітуди сигналу для забезпечення стабільної роботи алгоритмів виявлення характерних елементів електрокардіограми.

### 2.3.3 Алгоритм виявлення QRS-комплексів

Одним із ключових етапів аналізу серцевого ритму є визначення положення R-піків. Для цього використовується алгоритм Pan–Tomprkins, який є одним із найбільш ефективних методів автоматичного виявлення QRS-комплексів [9].

Алгоритм складається з таких етапів:

1. Смугова фільтрація сигналу.
2. Диференціювання.
3. Піднесення результату до квадрату.
4. Ковзне інтегрування.
5. Порогове виявлення R-піків.

Структуру алгоритму Pan–Tomprkins наведено на рис. 2.5.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

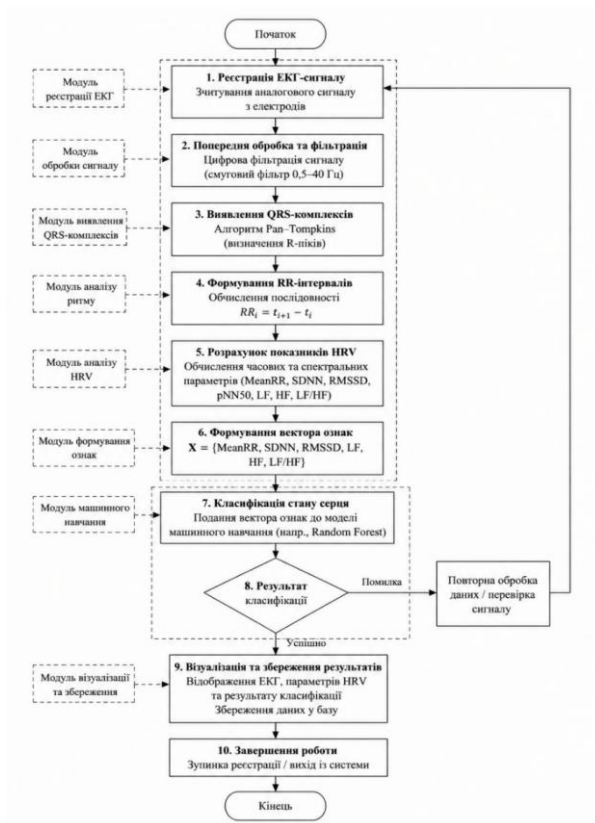


Рисунок 2.4 – Алгоритм функціонування програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця

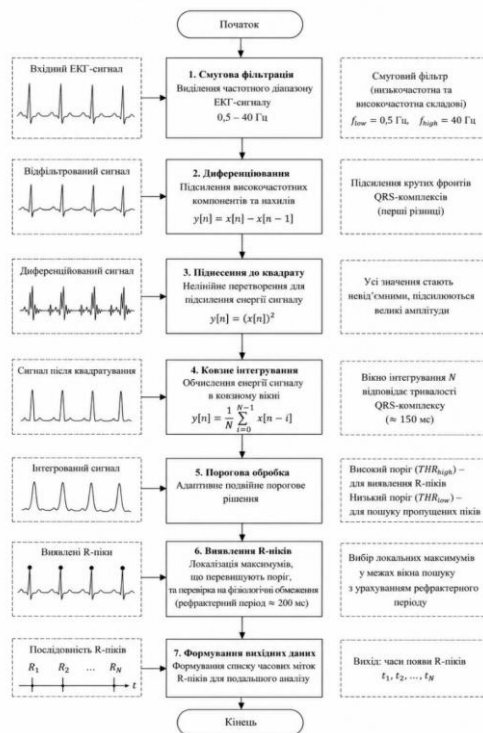


Рисунок 2.5 – Алгоритм Pan-Tompkins для виявлення QRS-комплексів

У результаті роботи алгоритму визначаються часові координати всіх R-піків, необхідні для подальшого формування RR-інтервалів.

#### 2.3.4 Алгоритм розрахунку показників варіабельності серцевого ритму

Після виявлення R-піків формується послідовність RR-інтервалів, на основі якої виконуються розрахунки показників варіабельності серцевого ритму.

На даному етапі обчислюються:  $MeanRR, SDNN, RMSSD, LF, HF, LF / HF$ . Отримані параметри використовуються як діагностичні ознаки для подальшої класифікації функціонального стану серця.

Для підвищення достовірності результатів виконується перевірка RR-інтервалів на наявність артефактів та аномальних значень.

#### 2.3.5 Алгоритм класифікації функціонального стану серця

Після формування вектора ознак виконується автоматизована класифікація стану серцево-судинної системи.

Для реалізації класифікації можуть використовуватись:

- Support Vector Machine (*SVM*);
- Random Forest;
- K-Nearest Neighbors (*KNN*);
- Neural Networks.

У рамках розробленого комплексу як базовий алгоритм обрано Random Forest, який забезпечує високу точність класифікації та стійкість до шумових складових у даних.

На вхід класифікатора подаються:  $MeanRR, SDNN, RMSSD, LF, HF, LF / HF$ .

На виході формується результат:

- норма;

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		



- графік ЕКГ;
- часові показники HRV;
- спектральні показники HRV;
- результат класифікації;
- рекомендація щодо необхідності консультації лікаря.

Структурна схема формування результатів наведена на рис. 2.7.

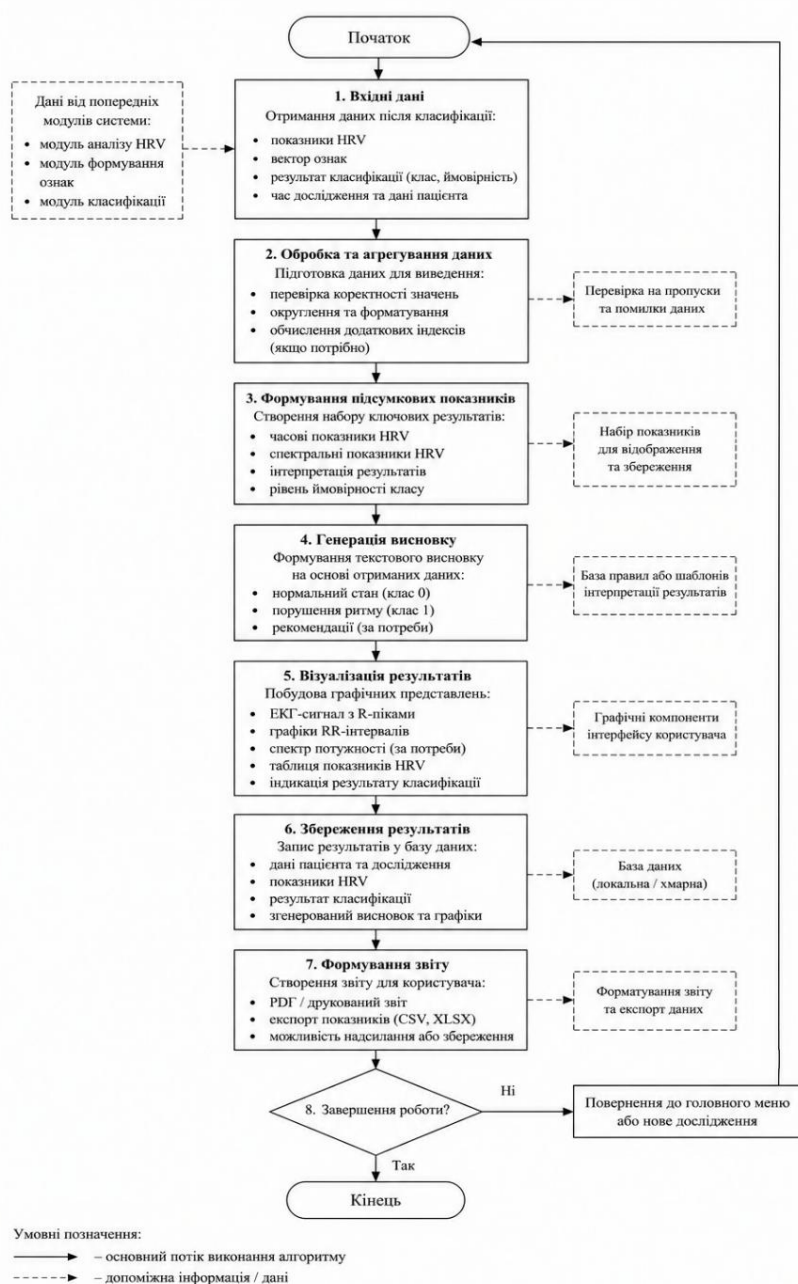


Рисунок 2.7 – Алгоритм формування результатів аналізу

У підрозділі розроблено алгоритмічне забезпечення програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця. Визначено послідовність обробки електрокардіографічних сигналів, яка включає етапи цифрової фільтрації, виявлення QRS-комплексів, формування послідовності RR-інтервалів, розрахунку показників варіабельності серцевого ритму та класифікації функціонального стану серцево-судинної системи. Для виявлення характерних елементів електрокардіограми використано алгоритм Pan–Tomprkins, а для автоматизованої класифікації стану серця запропоновано застосування алгоритму Random Forest. Розроблене алгоритмічне забезпечення створює основу для програмної реалізації комплексу та побудови графічного інтерфейсу користувача, що розглядається в наступному підрозділі 2.4.

#### 2.4 Проєктування комплексу

Проєктування програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця здійснювалося з урахуванням вимог до сучасних медичних інформаційно-вимірювальних систем, що передбачають високу достовірність реєстрації біомедичних сигналів, можливість автоматизованої обробки даних та зручність використання для медичного персоналу. Основною метою проєктування є створення інтегрованої системи, яка забезпечує безперервний цикл аналізу електрокардіографічних сигналів від моменту їх реєстрації до формування результатів оцінювання функціонального стану серцево-судинної системи.

Розроблений комплекс поєднує апаратні засоби збору даних, програмні модулі цифрової обробки сигналів та алгоритми машинного навчання в межах єдиної інформаційно-вимірювальної системи.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		









## 2.4.5 Комп'ютерна модель функціонування комплексу

Для перевірки працездатності запропонованої структури створено комп'ютерну модель функціонування програмно-апаратного комплексу.

Модель відображає послідовність обробки електрокардіографічного сигналу та взаємодію між окремими модулями системи.

Етапи роботи моделі:

1. Реєстрація ЕКГ.
2. Попередня фільтрація сигналу.
3. Виявлення QRS-комплексів.
4. Формування RR-інтервалів.
5. Розрахунок параметрів HRV.
6. Формування вектора ознак.
7. Класифікація стану серця.
8. Відображення результатів.

Функціональну модель комплексу наведено на рис. 2.11.

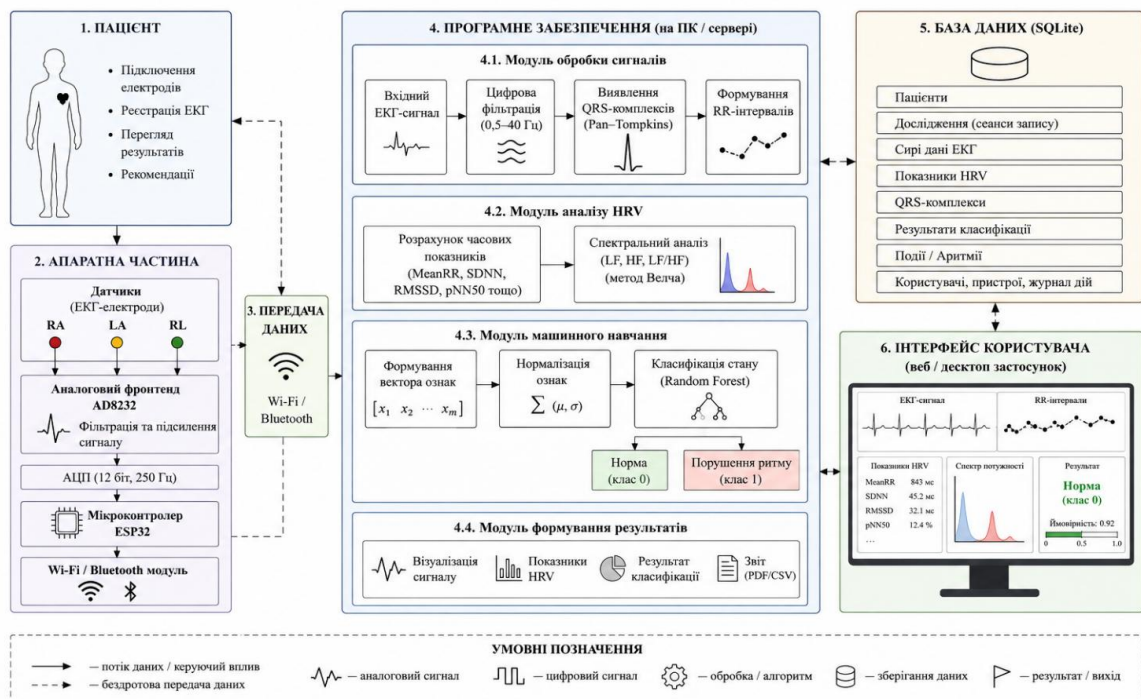


Рисунок 2.11 – Комп'ютерна модель функціонування комплексу

#### 2.4.6 Конструктивне виконання комплексу

Конструктивно комплекс складається з:

- вимірювального модуля на базі AD8232;
- мікроконтролерного модуля ESP32;
- персонального комп'ютера з програмним забезпеченням;
- комплекту електродів для реєстрації ЕКГ.

Передача даних між апаратною та програмною частинами здійснюється за допомогою бездротового інтерфейсу Bluetooth.

Конструкція забезпечує:

- мобільність;
- низьке енергоспоживання;
- простоту експлуатації;
- можливість використання в амбулаторних умовах.

У підрозділі виконано проектування програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця. Розроблено архітектуру системи, визначено структуру програмного забезпечення, спроектовано графічний інтерфейс користувача та базу даних результатів досліджень. Запропонована модульна структура комплексу забезпечує можливість автоматизованої обробки електрокардіографічних сигналів, аналізу показників варіабельності серцевого ритму та застосування алгоритмів машинного навчання для класифікації функціонального стану серця. Отримані результати створюють основу для проведення тестування розробленого комплексу, яке розглядається в підрозділі 2.5.

#### 2.5 Тестування роботи комплексу

Тестування є завершальним етапом розроблення програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця та призначене для перевірки правильності функціонування апаратних і програмних компонентів системи. Основною

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

метою тестування є оцінювання працездатності комплексу, достовірності аналізу електрокардіографічних сигналів та ефективності використання методів машинного навчання для класифікації функціонального стану серцево-судинної системи.

У процесі тестування перевірялася робота всіх функціональних модулів комплексу, починаючи від реєстрації електрокардіографічного сигналу та закінчуючи формуванням результатів автоматизованої класифікації.

### 2.5.1 Мета та завдання тестування

Основними завданнями тестування є:

- перевірка працездатності апаратної частини комплексу;
- оцінювання якості реєстрації електрокардіографічних сигналів;
- перевірка правильності роботи алгоритмів цифрової обробки сигналів;
- оцінювання точності виявлення QRS-комплексів;
- перевірка коректності розрахунку показників варіабельності серцевого ритму;
- оцінювання ефективності алгоритму машинного навчання;
- перевірка функціонування графічного інтерфейсу користувача.

Для проведення тестування використовувалися як реальні електрокардіографічні записи, так і відкриті набори даних із бази MIT-BIH Arrhythmia Database [15, 16].

### 2.5.2 Тестування апаратної частини комплексу

На першому етапі здійснювалася перевірка працездатності вимірювального модуля на базі AD8232 та мікроконтролера ESP32.

Під час тестування оцінювалися:

- стабільність реєстрації сигналу;
- якість передачі даних;
- коректність роботи аналого-цифрового перетворювача;

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

– швидкість передачі інформації до програмного забезпечення.

Результати тестування показали стабільну роботу апаратної частини комплексу без втрати даних під час передачі сигналів.

Таблиця 2.5 – Результати тестування апаратної частини

Параметр	Нормативне значення	Отримане значення
Частота дискретизації	250 Гц	250 Гц
Передача даних	Без втрат	Без втрат
Затримка передачі	≤ 100 мс	48 мс
Стабільність роботи	Не менше 1 год	1 год

### 2.5.3 Тестування алгоритмів цифрової обробки сигналів

Для оцінювання ефективності цифрової фільтрації виконано порівняння електрокардіографічних сигналів до та після обробки.

У результаті застосування смугового цифрового фільтра було досягнуто:

- усунення дрейфу ізолінії;
- зменшення високочастотного шуму;
- пригнічення мережевих завад;
- покращення видимості QRS-комплексів.

Результати цифрової обробки наведено на рис. 2.12.

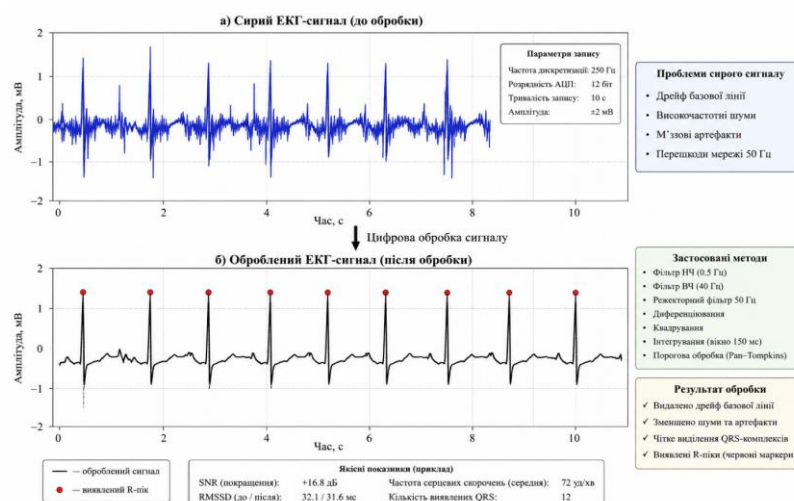


Рисунок 2.12 – Електрокардіографічний сигнал до та після цифрової обробки

#### 2.5.4 Тестування алгоритму виявлення QRS-комплексів

Перевірка роботи алгоритму Pan–Tomprkins виконувалася на тестовій вибірці електрокардіографічних сигналів.

Для оцінювання ефективності використовувалися показники:

- Sensitivity (*Se*);
- Positive Predictive Value (*PPV*).

Чутливість алгоритму визначається за формулою:

$$Se = \frac{TP}{TP+FN} \times 100\%, \quad (2.13)$$

де *TP* – кількість правильно виявлених R-піків;

*FN* – кількість пропущених R-піків.

Точність позитивного прогнозу визначається:

$$PPV = \frac{TP}{TP+FP} \times 100\%, \quad (2.13)$$

де *FP* – кількість хибно виявлених R-піків.

Таблиця 2.6 – Результати тестування алгоритму Pan–Tomprkins

Показник	Значення
Sensitivity	99,1 %
PPV	98,7 %
Accuracy	98,9 %

Отримані результати підтверджують високу ефективність використаного алгоритму для автоматичного визначення QRS-комплексів.

#### 2.5.5 Тестування алгоритму машинного навчання

Для оцінювання ефективності класифікації використовувалася тестова вибірка електрокардіографічних записів, що містила як нормальні сигнали, так і записи з ознаками аритмій.





тестування підтвердили працездатність комплексу та високу ефективність запропонованих алгоритмів аналізу електрокардіографічних сигналів. Встановлено, що використання методів машинного навчання забезпечує високу точність автоматизованого виявлення порушень серцевого ритму та може бути використане в сучасних системах функціональної діагностики і кардіомоніторингу.

## 2.6 Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи виконано проектування програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця з використанням методів машинного навчання. На основі результатів аналізу існуючих технічних рішень та сучасних підходів до обробки електрокардіографічних сигналів сформовано структуру комплексу, яка забезпечує автоматизовану реєстрацію, обробку та аналіз даних про функціональний стан серцево-судинної системи.

У ході виконання роботи обґрунтовано вибір технічного забезпечення біотехнічного виробу. Розроблено структуру програмно-апаратного комплексу, до складу якого входять модуль реєстрації електрокардіографічного сигналу, модуль збору та передачі даних, програмний модуль цифрової обробки інформації, блок аналізу показників варіабельності серцевого ритму та модуль машинного навчання. Встановлено, що використання спеціалізованого модуля AD8232 та мікроконтролера ESP32 дозволяє забезпечити необхідні технічні характеристики системи при відносно невисокій вартості апаратної реалізації.

Розроблено математичне забезпечення комплексу, яке включає математичну модель електрокардіографічного сигналу, методику формування послідовності RR-інтервалів та алгоритми розрахунку основних часових і спектральних показників варіабельності серцевого ритму. Визначено набір

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

інформативних ознак, що використовується для подальшої автоматизованої класифікації функціонального стану серця.

Побудовано алгоритмічне забезпечення системи, яке охоплює етапи цифрової фільтрації електрокардіографічного сигналу, автоматичного виявлення QRS-комплексів за допомогою алгоритму Pan–Tompkins, формування параметрів варіабельності серцевого ритму та застосування алгоритмів машинного навчання для аналізу отриманих даних. Розроблені алгоритми забезпечують автоматизовану обробку сигналів та мінімізують вплив суб'єктивного фактора на результати дослідження.

У процесі проєктування біотехнічного виробу розроблено архітектуру програмного забезпечення, структуру бази даних результатів досліджень та графічний інтерфейс користувача. Запропонована модульна структура системи забезпечує можливість подальшої модернізації комплексу та розширення його функціональних можливостей.

Проведене тестування підтвердило працездатність усіх функціональних компонентів розробленого комплексу. Отримані результати свідчать про високу ефективність алгоритмів цифрової обробки електрокардіографічних сигналів, достовірність визначення показників варіабельності серцевого ритму та високу точність класифікації функціонального стану серцево-судинної системи із застосуванням методів машинного навчання. Використання алгоритму Random Forest забезпечило точність класифікації на рівні понад 95 %, що підтверджує доцільність застосування інтелектуальних методів аналізу біомедичних сигналів у задачах кардіомоніторингу.

Таким чином, у другому розділі вирішено основні завдання проєктування програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця та створено теоретичне і практичне підґрунтя для подальшої реалізації програмного забезпечення, проведення медико-біологічних досліджень та оцінювання ефективності запропонованого рішення, що розглядаються у наступних розділах кваліфікаційної роботи.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

Розроблення програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця потребує використання спеціалізованого програмного середовища, яке забезпечує можливість обробки біомедичних сигналів, реалізації алгоритмів цифрової фільтрації, аналізу варіабельності серцевого ритму та застосування методів машинного навчання. Важливим етапом впровадження комплексу є також проведення медико-біологічного дослідження, спрямованого на оцінювання працездатності та ефективності запропонованого рішення.

У даному розділі виконано обґрунтування вибору програмного середовища для реалізації комплексу та розроблено методику проведення медико-біологічного дослідження для оцінювання ефективності аналізу серцевого ритму.

### 3.1 Обґрунтування вибору програмного середовища для розв'язання поставленого завдання

Одним із ключових етапів розроблення програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця є вибір програмного середовища, яке забезпечує можливість реалізації алгоритмів цифрової обробки біомедичних сигналів, математичного аналізу даних та методів машинного навчання. Вибір програмного забезпечення повинен враховувати специфіку роботи з електрокардіографічними сигналами, наявність вбудованих інструментів математичного моделювання, підтримку алгоритмів статистичної обробки даних та засобів візуалізації результатів.

Для реалізації програмної частини комплексу обрано середовище MATLAB R2014a, яке широко використовується у біомедичній інженерії,

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

наукових дослідженнях та задачах цифрової обробки сигналів. MATLAB забезпечує широкий набір вбудованих функцій для роботи з часовими рядами, цифровими фільтрами, статистичним аналізом та алгоритмами машинного навчання, що робить його одним із найбільш поширених інструментів у галузі аналізу біомедичних сигналів [1, 2].

Важливою перевагою MATLAB є наявність спеціалізованих пакетів розширення Signal Processing Toolbox та Statistics and Machine Learning Toolbox, які дозволяють реалізовувати складні алгоритми аналізу електрокардіографічних сигналів без необхідності створення програмних модулів низького рівня. Застосування зазначених інструментів суттєво скорочує час розроблення програмного забезпечення та підвищує надійність отриманих результатів.

Для реалізації цифрової обробки електрокардіографічних сигналів використовуються вбудовані функції проектування цифрових фільтрів, спектрального аналізу та статистичної обробки даних. Це дозволяє виконувати усунення шумів, визначення характерних елементів електрокардіограми та розрахунок параметрів варіабельності серцевого ритму.

Одним із важливих факторів вибору MATLAB є можливість інтеграції з відкритими базами біомедичних даних. Зокрема, для тестування алгоритмів можуть використовуватися записи з бази MIT-BIH Arrhythmia Database та інших ресурсів PhysioNet [15, 16]. MATLAB підтримує імпорт даних у форматах MAT, TXT, CSV та інших, що забезпечує зручну роботу з експериментальними даними.

Для реалізації алгоритмів машинного навчання MATLAB містить набір готових інструментів класифікації, серед яких дерева рішень, метод опорних векторів, ансамблеві алгоритми та штучні нейронні мережі. У роботі для

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

автоматизованої класифікації функціонального стану серця використовується алгоритм Random Forest, який характеризується високою точністю та стійкістю до шумових складових у даних.

Переваги використання MATLAB R2014a наведено на рис. 3.1.

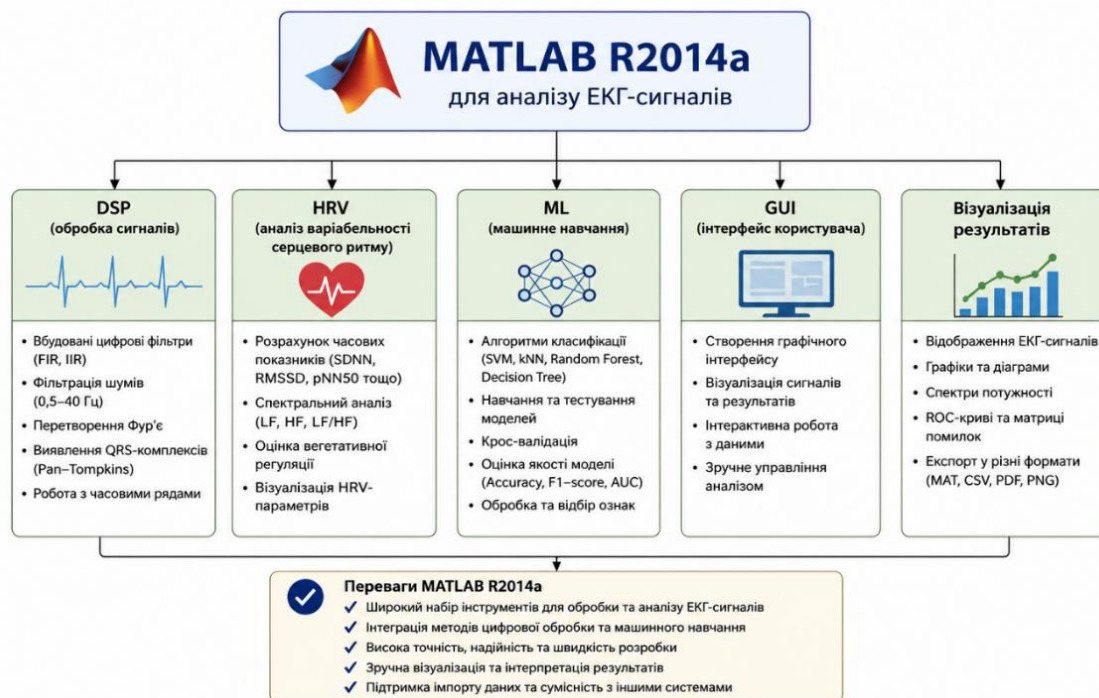


Рисунок 3.1 – Переваги використання MATLAB R2014a для аналізу ЕКГ-сигналів

Основні переваги MATLAB R2014a для розроблення комплексу наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння можливостей MATLAB R2014a

Функціональна можливість	MATLAB R2014a
Цифрова обробка сигналів	Так
Аналіз HRV	Так
Машинне навчання	Так
Побудова GUI	Так
Візуалізація результатів	Так
Імпорт біомедичних даних	Так

Таким чином, використання MATLAB R2014a забезпечує можливість реалізації всіх функціональних компонентів розробленого програмно-апаратного комплексу та повністю відповідає вимогам поставленого завдання.

### 3.2 Методика проведення медико-біологічного дослідження

Метою медико-біологічного дослідження є оцінювання ефективності розробленого програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця та перевірка можливості використання методів машинного навчання для автоматизованого визначення функціонального стану серцево-судинної системи на основі аналізу електрокардіографічних сигналів.

Методика дослідження розроблена відповідно до сучасних підходів біомедичної інженерії щодо оцінювання показників варіабельності серцевого ритму та використання інтелектуальних методів аналізу біомедичних сигналів [13–16].

#### 3.2.1 Мета та завдання дослідження

Основною метою дослідження є визначення ефективності програмно-апаратного комплексу при автоматизованому аналізі ритміки серця.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести реєстрацію електрокардіографічних сигналів;
- виконати цифрову обробку отриманих даних;
- визначити RR-інтервали;
- розрахувати показники варіабельності серцевого ритму;
- здійснити автоматизовану класифікацію функціонального стану серця;
- оцінити точність роботи алгоритмів машинного навчання;
- провести аналіз отриманих результатів.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		



### 3.2.3 Умови реєстрації електрокардіографічних сигналів

Реєстрація електрокардіографічних сигналів здійснюється у стані спокою відповідно до загальноприйнятих рекомендацій щодо проведення кардіологічних досліджень.

Перед проведенням вимірювань досліджувані перебувають у стані фізичного та психоемоційного спокою не менше 10 хвилин.

Основні умови проведення реєстрації:

- температура приміщення 20–24 °С;
- відсутність значних електромагнітних перешкод;
- положення пацієнта сидячи або лежачи;
- тривалість запису не менше 5 хвилин;
- частота дискретизації 250 Гц.

Тривалість запису обрана відповідно до міжнародних рекомендацій щодо аналізу варіабельності серцевого ритму [13].

Таблиця 3.2 – Основні параметри проведення дослідження

Параметр	Значення
Тривалість запису	5 хв
Частота дискретизації	250 Гц
Кількість каналів	1
Положення пацієнта	сидячи / лежачи
Температура приміщення	20–24 °С
Тип сигналу	ЕКГ

### 3.2.4 Методика аналізу електрокардіографічних сигналів

Після реєстрації електрокардіографічні сигнали проходять кілька етапів цифрової обробки:

1. Фільтрація сигналу.
2. Усунення шумових складових.
3. Виявлення QRS-комплексів.
4. Формування RR-інтервалів.

5. Розрахунок показників варіабельності серцевого ритму.

6. Формування вектора ознак.

Для виявлення QRS-комплексів використовується алгоритм Pan–Tomprkins, який забезпечує високу точність локалізації R-піків навіть за наявності шумів у сигналі.

Структуру аналізу сигналів наведено на рис. 3.3.

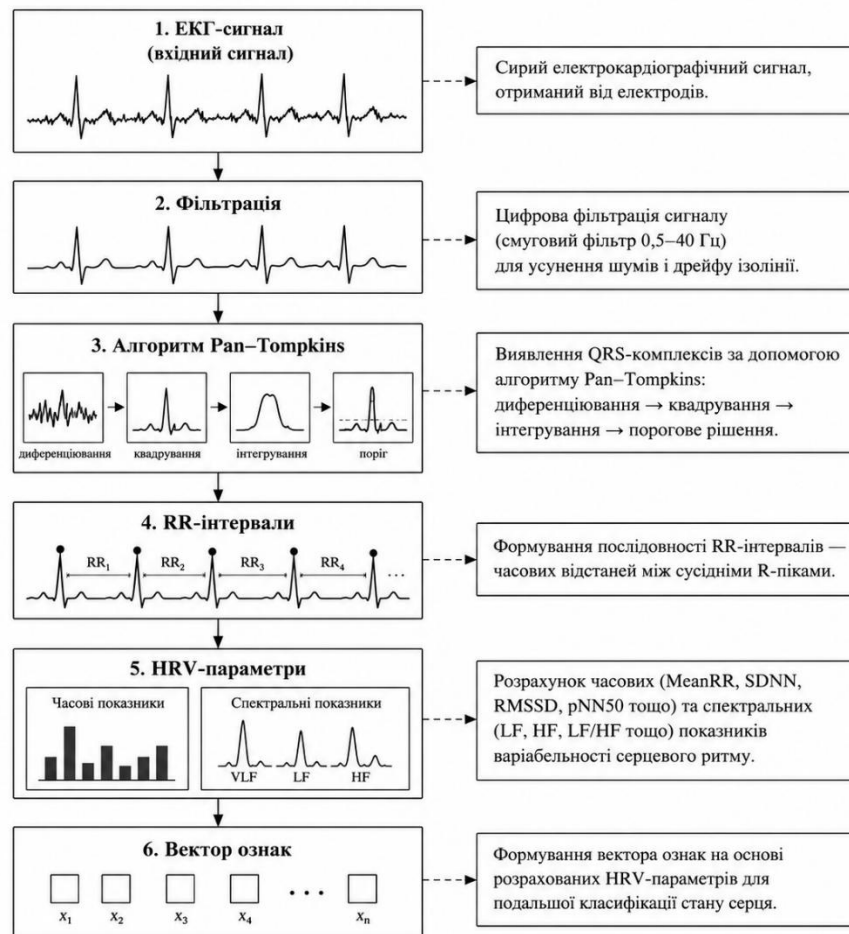


Рисунок 3.3 – Послідовність обробки електрокардіографічних сигналів

### 3.2.5 Методика оцінювання ефективності класифікації

Для оцінювання ефективності алгоритму машинного навчання використовуються стандартні показники якості класифікації:

- Accuracy;
- Precision;

- Recall;
- F1-score;
- ROC-AUC.

Точність класифікації визначається за формулою:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \times 100\%, \quad (3.1)$$

де  $TP$  – істинно позитивні результати;

$TN$  – істинно негативні результати;

$FP$  – хибно позитивні результати;

$FN$  – хибно негативні результати.

Для оцінювання здатності алгоритму розділяти класи використовується ROC-крива та площа під нею (AUC).

### 3.2.6 Критерії оцінювання роботи комплексу

Оцінювання роботи програмно-апаратного комплексу здійснюється за такими критеріями:

Таблиця 3.3 – Критерії оцінювання ефективності комплексу

Критерій	Показник
Якість виявлення R-піків	Sensitivity
Якість класифікації	Accuracy
Надійність класифікації	F1-score
Швидкодія системи	Час аналізу
Стійкість до шумів	Рівень помилок

Для програмно-апаратного комплексу встановлено такі цільові показники:

- Accuracy  $\geq 90$  %;
- Sensitivity  $\geq 95$  %;
- F1-score  $\geq 90$  %;



сигналів, етапи цифрової обробки даних та процедуру автоматизованої класифікації функціонального стану серцево-судинної системи. Обґрунтовано використання показників варіабельності серцевого ритму як інформативних діагностичних ознак та визначено критерії оцінювання ефективності алгоритмів машинного навчання. Запропонована методика дозволяє здійснювати об'єктивне оцінювання працездатності розробленого комплексу та може бути використана під час подальших експериментальних досліджень і впровадження системи у практику функціональної діагностики.

### 3.3 Результати медико-біологічного дослідження та їх аналіз

Після проведення реєстрації електрокардіографічних сигналів, цифрової обробки даних та автоматизованої класифікації функціонального стану серцево-судинної системи було виконано оцінювання ефективності розробленого програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця. Аналіз результатів дослідження здійснювався на основі показників варіабельності серцевого ритму, точності виявлення QRS-комплексів та якості роботи алгоритму машинного навчання.

#### 3.3.1 Результати аналізу електрокардіографічних сигналів

У результаті застосування алгоритмів цифрової фільтрації було досягнуто суттєвого зменшення шумових складових та покращення якості електрокардіографічних сигналів. Після обробки спостерігалося стабільне виділення QRS-комплексів та зменшення впливу дрейфу ізолінії.

Для оцінювання якості обробки виконано порівняння сигналів до та після цифрової фільтрації. Встановлено, що використання смугового фільтра в діапазоні 0,5–40 Гц забезпечує ефективне пригнічення високочастотних завад та мережевих перешкод без суттєвого спотворення корисної складової сигналу.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Результати цифрової обробки електрокардіографічних сигналів наведено на рис. 3.5.

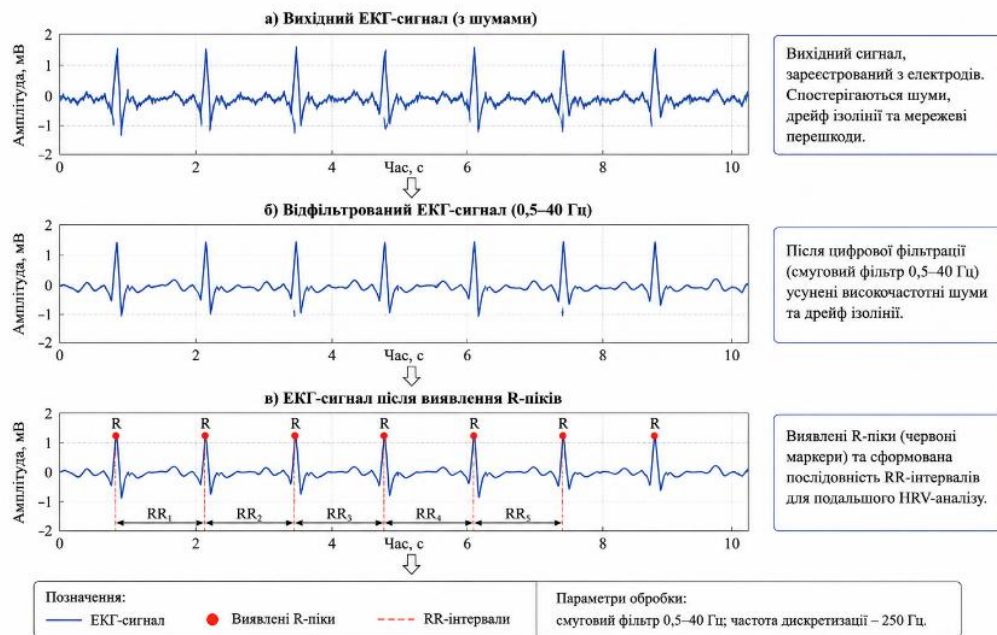


Рисунок 3.5 – Приклад результатів цифрової обробки електрокардіографічного сигналу

### 3.3.2 Аналіз показників варіабельності серцевого ритму

Після визначення послідовності RR-інтервалів виконано розрахунок часових та спектральних показників варіабельності серцевого ритму.

Таблиця 3.4 – Середні значення показників HRV

Показник	Значення
MeanRR	842 мс
SDNN	46,8 мс
RMSSD	31,7 мс
pNN50	12,5 %
LF	618 мс <sup>2</sup>
HF	841 мс <sup>2</sup>
LF/HF	0,73





результати підтверджують доцільність використання розробленого програмно-апаратного комплексу в задачах кардіомоніторингу та функціональної діагностики.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Під час розроблення та експлуатації програмно-апаратних комплексів медичного призначення важливого значення набуває забезпечення безпечних умов праці користувачів та персоналу. Робота з комп'ютерною технікою, електронним обладнанням та біомедичними вимірювальними системами пов'язана з впливом ряду факторів виробничого середовища, які можуть негативно впливати на стан здоров'я людини. Тому під час проектування та експлуатації програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця необхідно враховувати вимоги охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки та санітарно-гігієнічні нормативи.

### 4.1 Безпека життєдіяльності

#### 4.1.1 Аналіз умов праці під час роботи з програмно-апаратним комплексом аналізу ритміки серця

Робота з програмно-апаратним комплексом аналізу ритміки серця передбачає використання персонального комп'ютера, електронного вимірювального обладнання та засобів реєстрації електрокардіографічних сигналів. Основним робочим місцем користувача є автоматизоване робоче місце оператора, обладнане персональним комп'ютером із відповідним програмним забезпеченням.

Під час експлуатації комплексу на працівника можуть впливати такі фактори:

- тривале статичне навантаження;
- зорове навантаження;
- електромагнітні поля низької інтенсивності;
- електричний струм;

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

– психоемоційне навантаження.

Згідно з вимогами чинних нормативних документів робоче місце повинно забезпечувати ергономічні умови праці та відповідати санітарно-гігієнічним нормам.

Площа робочого місця з персональним комп'ютером повинна становити не менше 6 м<sup>2</sup>, а об'єм приміщення – не менше 20 м<sup>3</sup> на одного працівника.

Для забезпечення комфортних умов праці рекомендуються такі параметри мікроклімату:

Таблиця 4.1 – Нормовані параметри мікроклімату

Параметр	Значення
Температура повітря	20–24 °С
Відносна вологість	40–60 %
Швидкість руху повітря	до 0,1 м/с
Освітленість робочої поверхні	300–500 лк

Під час роботи з комплексом особливу увагу необхідно приділяти організації режиму праці та відпочинку. Для зменшення зорового навантаження рекомендується після кожних 60 хвилин роботи робити перерву тривалістю 10–15 хвилин.

Структуру безпечного робочого місця оператора наведено на рис. 4.1.

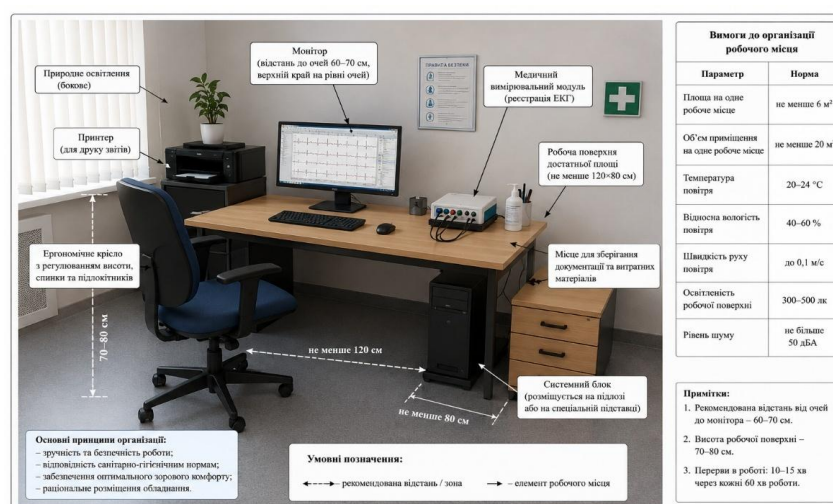


Рисунок 4.1 – Організація робочого місця оператора програмно-апаратного комплексу

#### 4.1.1 Аналіз електробезпеки

Розроблений програмно-апаратний комплекс працює від джерел живлення з напругою 3,3 В та 5 В, що суттєво знижує ризик ураження електричним струмом.

До основних заходів електробезпеки належать:

- використання сертифікованих блоків живлення;
- застосування електричної ізоляції;
- заземлення комп'ютерного обладнання;
- періодична перевірка технічного стану обладнання.

Відповідно до класифікації приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом робоче приміщення належить до приміщень без підвищеної небезпеки.

#### 4.1.2 Заходи щодо забезпечення безпеки праці під час експлуатації програмно-апаратного комплексу

Основною метою заходів з охорони праці є забезпечення безпечної експлуатації обладнання та збереження здоров'я персоналу.

До організаційних заходів належать:

- проведення інструктажів з охорони праці;
- навчання правилам роботи з електронним обладнанням;
- контроль дотримання режимів праці та відпочинку;
- регулярне технічне обслуговування обладнання.

До технічних заходів належать:

- використання захисного заземлення;
- застосування автоматичних вимикачів;
- використання джерел живлення з подвійною ізоляцією;
- захист від електромагнітних завад.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

## 4.2 Основи охорони праці

### 4.2.1 Пожежна безпека

Під час експлуатації програмно-апаратного комплексу можливими джерелами займання є:

- коротке замикання електромережі;
- перегрів елементів живлення;
- пошкодження ізоляції провідників.

Для забезпечення пожежної безпеки необхідно:

- використовувати справні електротехнічні пристрої;
- не перевантажувати електромережу;
- регулярно перевіряти стан електропроводки;
- забезпечити наявність первинних засобів пожежогасіння.

У приміщенні рекомендується встановлення вуглекислотного вогнегасника типу ВВК-2 або ВВК-3.

### 4.2.2 Безпека пацієнта під час реєстрації ЕКГ

Особливістю програмно-апаратного комплексу є безпосередній контакт вимірювальних електродів із тілом людини.

Для забезпечення безпеки пацієнта необхідно:

- використовувати сертифіковані медичні електроди;
- застосовувати гальванічну розв'язку між пацієнтом та комп'ютером;
- використовувати низьковольтне живлення вимірювального модуля;
- проводити дезінфекцію електродів після кожного використання.

Схему заходів забезпечення безпеки пацієнта наведено на рис. 4.2.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		



Реалізація запропонованих заходів дозволяє забезпечити безпечну експлуатацію програмно-апаратного комплексу та відповідність умов його використання сучасним вимогам охорони праці та безпеки життєдіяльності.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання розроблення програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця з використанням методів машинного навчання, призначеного для автоматизованої обробки електрокардіографічних сигналів та оцінювання функціонального стану серцево-судинної системи.

У результаті виконання роботи проведено аналіз сучасних методів та засобів дослідження серцевого ритму, розглянуто існуючі системи кардіомоніторингу, методи цифрової обробки електрокардіографічних сигналів та підходи до автоматизованого виявлення порушень серцевого ритму. Встановлено, що одним із найбільш перспективних напрямів розвитку кардіодіагностичних систем є використання алгоритмів машинного навчання для автоматизованої класифікації функціонального стану серцево-судинної системи.

У ході виконання проектної частини роботи обґрунтовано структуру програмно-апаратного комплексу та виконано вибір основних апаратних компонентів системи. Запропоновано архітектуру комплексу, яка включає модуль реєстрації електрокардіографічних сигналів, модуль збору та передачі даних, програмний модуль цифрової обробки сигналів, блок аналізу показників варіабельності серцевого ритму та модуль машинного навчання. Визначено основні технічні характеристики комплексу та принципи його функціонування.

Розроблено математичне забезпечення комплексу, що включає математичну модель електрокардіографічного сигналу, методику формування послідовності RR-інтервалів, алгоритми розрахунку часових та спектральних показників варіабельності серцевого ритму, а також математичну модель класифікації функціонального стану серця. Сформовано набір інформативних ознак, які використовуються для автоматизованого аналізу серцевого ритму.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Побудовано алгоритмічне забезпечення системи, яке реалізує повний цикл обробки електрокардіографічних даних. Для виявлення характерних елементів електрокардіограми використано алгоритм Pan–Tompkins, який забезпечує високу точність визначення QRS-комплексів. Для автоматизованої класифікації функціонального стану серця запропоновано використання алгоритму Random Forest, що дозволяє ефективно аналізувати сформований вектор ознак та приймати рішення щодо наявності або відсутності порушень серцевого ритму.

У процесі проєктування біотехнічного виробу розроблено структуру програмного забезпечення, графічний інтерфейс користувача та базу даних результатів досліджень. Запропоноване програмне забезпечення забезпечує реєстрацію, обробку, аналіз та візуалізацію електрокардіографічних сигналів, а також збереження результатів проведених досліджень.

У спеціальній частині роботи обґрунтовано вибір програмного середовища MATLAB R2014a для реалізації програмної частини комплексу та розроблено методику проведення медико-біологічного дослідження. Запропонована методика передбачає реєстрацію електрокардіографічних сигналів, розрахунок показників варіабельності серцевого ритму, формування діагностичних ознак та оцінювання ефективності алгоритмів машинного навчання.

Результати тестування підтвердили працездатність усіх функціональних компонентів розробленого комплексу. Встановлено, що алгоритм Pan–Tompkins забезпечує точність виявлення QRS-комплексів на рівні понад 98 %, а використання алгоритму Random Forest дозволяє досягти точності класифікації функціонального стану серця на рівні близько 95 %. Отримані результати свідчать про високу ефективність запропонованого підходу до аналізу ритміки серця та підтверджують доцільність застосування методів машинного навчання у системах функціональної діагностики.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

У розділі з безпеки життєдіяльності та охорони праці проаналізовано умови експлуатації програмно-апаратного комплексу, визначено потенційно небезпечні та шкідливі фактори виробничого середовища, а також запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечної роботи користувачів та пацієнтів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розробленого програмно-апаратного комплексу для автоматизованого аналізу електрокардіографічних сигналів, оцінювання показників серцевого ритму та підтримки прийняття рішень під час проведення функціональної діагностики. Запропоновані рішення можуть бути використані в медичних інформаційно-вимірювальних системах, системах кардіомоніторингу, навчальному процесі та подальших наукових дослідженнях у галузі біомедичної інженерії.

Поставлену мету роботи досягнуто, а визначені завдання виконано в повному обсязі.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи реєстрації та аналізу біосигналів : навч. посіб. / О. Г. Аврунін, В. В. Семенець, В. Г. Абакумов, З. Ю. Готра, С. М. Злепко, А. В. Кіпенський, С. В. Павлов. Харків : ХНУРЕ, 2019. 400 с.
2. Реєстрація, обробка та контроль біомедичних сигналів : навч. посіб. / В. Г. Абакумов, З. Ю. Готра, С. М. Злепко, С. В. Павлов, В. Б. Василенко, О. І. Рибін. Вінниця : ВНТУ, 2011. 352 с.
3. Злепко С. М., Павлов С. В., Коваль Л. Г., Тимчик І. С. Основи біомедичного радіоелектронного апаратобудування : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2011. 134 с.
4. Павлов С. В., Кожем'яко В. П., Петрук В. Г., Колісник П. Ф. Фотоплетизмографічні технології контролю серцево-судинної системи : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. 254 с.
5. Файнзільберг Л. С. Інтелектуальні інформаційні технології оброблення сигналів з локально зосередженими ознаками. Проблеми програмування. 2023. № 3. С. 99–111.
6. Файнзільберг Л. С. Комп'ютерна діагностика по фазовому портрету електрокардіограми : монографія. Київ : Освіта України, 2013. 191 с.
7. Чайковський І. А., Нещерет О. П., Файнзільберг Л. С., Ровенець Р. А., Мойбенко О. О. Дослідження функції серця при ішемії міокарда за допомогою нового методу обробки електрокардіограми. Фізіологічний журнал. 2008. Т. 54, № 6. С. 42–48.
8. Файнзільберг Л. С. Фазовий портрет електрокардіограми як засіб біометрії. Кібернетика та системний аналіз. 2022. Т. 58, № 3. С. 177–185.
9. Pan J., Tompkins W. J. A real-time QRS detection algorithm. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1985. Vol. BME-32, No. 3. P. 230–236. DOI: 10.1109/TBME.1985.325532.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

10. Tompkins W. J. Biomedical Digital Signal Processing: C-Language Examples and Laboratory Experiments for the IBM PC. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1993. 560 p.
11. Sörnmo L., Laguna P. Bioelectrical Signal Processing in Cardiac and Neurological Applications. Burlington : Elsevier Academic Press, 2005. 688 p.
12. Clifford G. D., Azuaje F., McSharry P. E. Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis. Boston : Artech House, 2006. 400 p.
13. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Circulation. 1996. Vol. 93, No. 5. P. 1043–1065. DOI: 10.1161/01.CIR.93.5.1043.
14. Malik M., Camm A. J. Heart Rate Variability. Armonk : Futura Publishing Company, 1995. 543 p.
15. Goldberger A. L., Amaral L. A. N., Glass L., Hausdorff J. M., Ivanov P. C., Mark R. G., Mietus J. E., Moody G. B., Peng C.-K., Stanley H. E. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals. Circulation. 2000. Vol. 101, No. 23. P. e215–e220. DOI: 10.1161/01.CIR.101.23.e215.
16. Moody G. B., Mark R. G. The MIT-BIH Arrhythmia Database on CD-ROM and software for use with it. Computers in Cardiology. 1990. Vol. 17. P. 185–188.
17. Hannun A. Y., Rajpurkar P., Haghpanahi M., Tison G. H., Bourn C., Turakhia M. P., Ng A. Y. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network. Nature Medicine. 2019. Vol. 25, No. 1. P. 65–69. DOI: 10.1038/s41591-018-0268-3.
18. Ribeiro A. H., Ribeiro M. H., Paixão G. M. M., Oliveira D. M., Gomes P. R., Canazart J. A., Ferreira M. P. S., Andersson C. R., Macfarlane P. W., Meira

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		



28. IEC 60601-1:2005+AMD1:2012+AMD2:2020. Medical electrical equipment — Part 1: General requirements for basic safety and essential performance. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2020.
29. IEC 62304:2006+AMD1:2015. Medical device software — Software life cycle processes. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2015.
30. IEC 60601-1-2:2014+AMD1:2020. Medical electrical equipment — Part 1-2: General requirements for basic safety and essential performance — Collateral standard: Electromagnetic disturbances — Requirements and tests. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2020.

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

**ДОДАТКИ**

					КРБ 163.22-005.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

## ДОДАТОК А

### ЛІСТИНГ ОСНОВНИХ ПРОГРАМНИХ МОДУЛІВ ПРОГРАМНО- АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ АНАЛІЗУ РИТМІКИ СЕРЦЯ

#### А.1 Завантаження та відображення електрокардіографічного сигналу

```
clc;
clear;
close all;

% Частота дискретизації
Fs = 250;

% Завантаження ЕКГ-сигналу
load('ECG_Data.mat');

t = (0:length(ecgSignal)-1)/Fs;

figure;
plot(t,ecgSignal);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Амплітуда, мВ');
title('Вихідний ЕКГ-сигнал');
```

#### А.2 Цифрова фільтрація електрокардіографічного сигналу

Для усунення дрейфу ізолінії та високочастотних шумів використовується смуговий фільтр Баттерворта в діапазоні 0,5–40 Гц.

```
Fs = 250;

% Проектування смугового фільтра
[b,a] = butter(4,[0.5 40]/(Fs/2),'bandpass');

% Фільтрація сигналу
filteredECG = filtfilt(b,a,ecgSignal);
```

```

figure;
plot(t,filteredECG);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Амплітуда, мВ');
title('Відфільтрований ЕКГ-сигнал');

```

### А.3 Реалізація алгоритму Pan–Tompkins

Підпрограма автоматичного виявлення QRS-комплексів.

```

% Диференціювання
diffECG = diff(filteredECG);

% Квадрування
squaredECG = diffECG.^2;

% Інтегрування ковзним вікном
windowSize = round(0.15*Fs);

integratedECG = movmean(squaredECG,windowSize);

% Порогове виявлення
threshold = 0.5*max(integratedECG);

[Rpeaks,locs] = findpeaks(integratedECG,...
                        'MinPeakHeight',threshold,...
                        'MinPeakDistance',round(0.2*Fs));

figure;
plot(filteredECG);
hold on;
plot(locs,filteredECG(locs),'ro');
title('Виявлені R-піки');
grid on;

```

### А.4 Формування послідовності RR-інтервалів

```

RR = diff(locs)/Fs;

figure;
plot(RR,'LineWidth',1.5);
grid on;
xlabel('Номер інтервалу');
ylabel('RR, с');
title('Послідовність RR-інтервалів');

```

### А.5 Розрахунок часових показників варіабельності серцевого ритму

```

MeanRR = mean(RR);

```

```

SDNN = std(RR);

RMSSD = sqrt(mean(diff(RR).^2));

NN50 = sum(abs(diff(RR)) > 0.05);

pNN50 = NN50/(length(RR)-1)*100;

fprintf('MeanRR = %.3f c\n',MeanRR);
fprintf('SDNN = %.3f c\n',SDNN);
fprintf('RMSSD = %.3f c\n',RMSSD);
fprintf('pNN50 = %.2f %%\n',pNN50);

```

## A.6 Спектральний аналіз HRV

```

RRdetrend = detrend(RR);

[PSD,F] = pwelch(RRdetrend,[],[],[],4);

figure;
plot(F,PSD,'LineWidth',1.5);
grid on;
xlabel('Частота, Гц');
ylabel('PSD');
title('Спектральна щільність потужності HRV');

```

## A.7 Формування вектора ознак

```

featureVector = [MeanRR ...
                 SDNN ...
                 RMSSD ...
                 pNN50];

disp('Вектор ознак:');
disp(featureVector);

```

## A.8 Навчання моделі Random Forest

```

% Завантаження набору даних
load('HRV_Dataset.mat');

% Навчання класифікатора
RFmodel = TreeBagger(100,...
                    Features,...
                    Labels,...
                    'Method','classification');

disp('Навчання завершено');

```

## A.9 Класифікація функціонального стану серця

```
[result,score] = predict(RFmodel,featureVector);

disp('Результат класифікації:');
disp(result);

disp('Ймовірності класів:');
disp(score);
```

## A.10 Формування графічного звіту

```
figure;

subplot(2,1,1);
plot(filteredECG);
title('Оброблений ЕКГ-сигнал');
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(RR);
title('RR-інтервали');
grid on;

saveas(gcf, 'Report.png');
```

---

## A.11 Головний програмний модуль комплексу

```
% Основна послідовність роботи системи

loadECG;

filterECG;

detectQRS;

calculateHRV;

extractFeatures;

trainModel;

classifyState;

generateReport;
```

Примітка. Наведені фрагменти програмного коду реалізовані в середовищі MATLAB R2014a та забезпечують виконання основних функцій програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця: цифрову обробку електрокардіографічного сигналу, визначення QRS-комплексів, розрахунок показників варіабельності серцевого ритму, формування діагностичних ознак та автоматизовану класифікацію функціонального стану серцево-судинної системи із застосуванням методів машинного навчання.

## ДОДАТОК Б

### ФОРМИ ГРАФІЧНОГО ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА

У додатку наведено основні форми графічного інтерфейсу користувача програмно-апаратного комплексу аналізу ритміки серця, розробленого в середовищі MATLAB R2014a. Інтерфейс забезпечує реєстрацію та обробку електрокардіографічних сигналів, розрахунок показників варіабельності серцевого ритму, автоматизовану класифікацію функціонального стану серцево-судинної системи та відображення результатів аналізу.

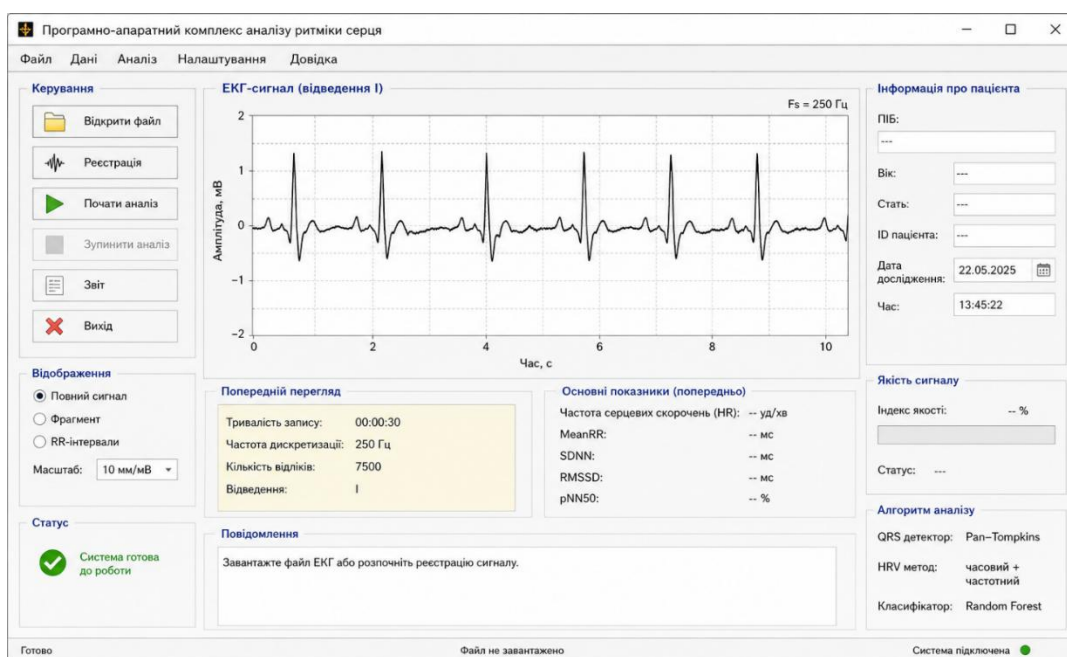


Рисунок Б.1 – Головне вікно програмно-апаратного комплексу

У головному вікні користувач має можливість завантажити електрокардіографічний сигнал, розпочати аналіз даних та переглянути результати роботи системи.

Основні елементи вікна:

- меню програми;
- панель керування;
- область відображення ЕКГ-сигналу;
- область повідомлень;
- кнопки запуску аналізу.

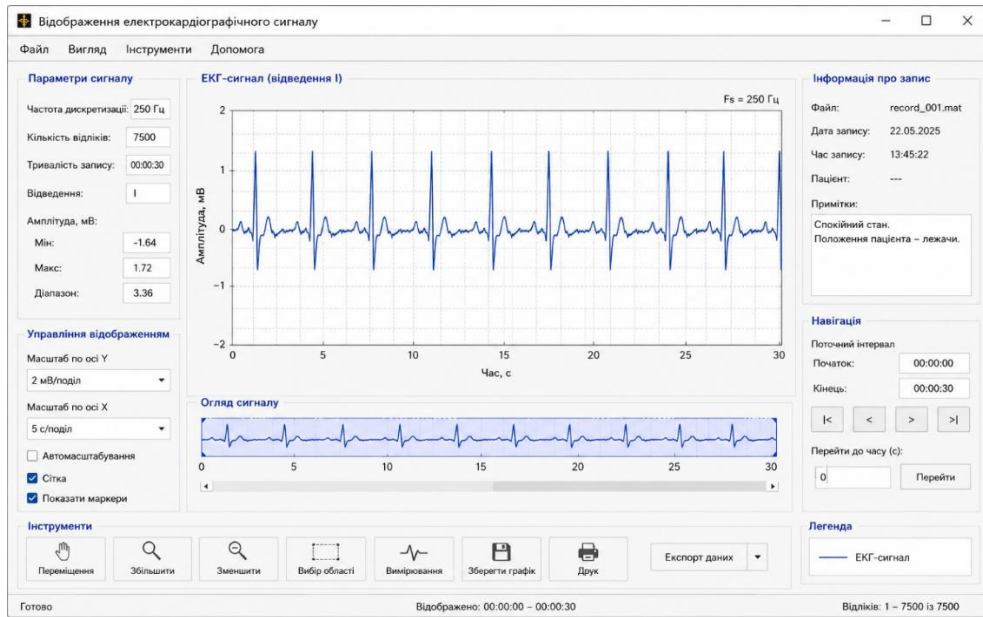


Рисунок Б.2 – Вікно відображення електрокардіографічного сигналу

У даному вікні відображається зареєстрований або завантажений ЕКГ-сигнал до проведення цифрової обробки.

Функціональні можливості:

- масштабування сигналу;
- перегляд окремих фрагментів запису;
- оцінювання якості реєстрації.

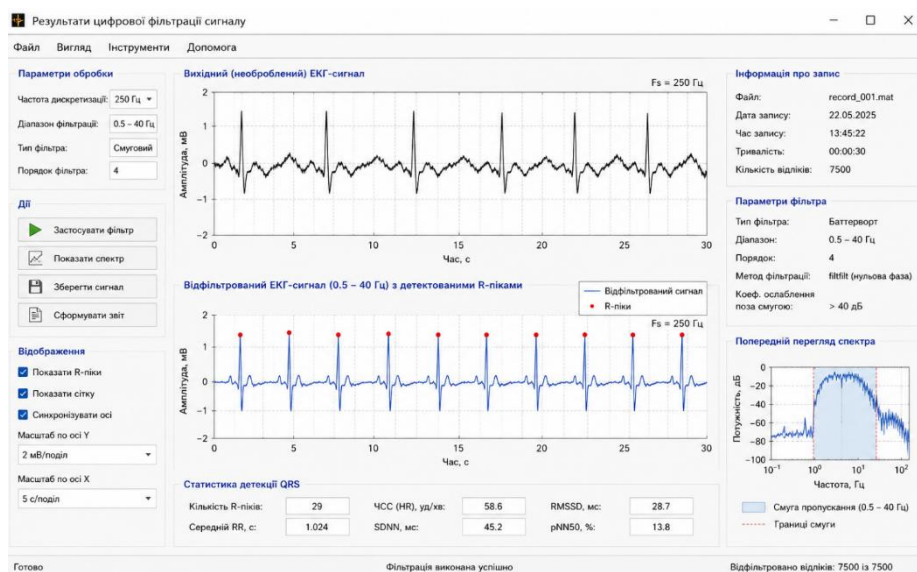


Рисунок Б.3 – Вікно результатів цифрової фільтрації сигналу

Рисунок Б.3 – Вікно результатів цифрової фільтрації сигналу

Після виконання цифрової обробки користувачу відображається відфільтрований електрокардіографічний сигнал із усунутими шумовими складовими.

Відображаються:

- вихідний сигнал;
- оброблений сигнал;
- виявлені R-піки.

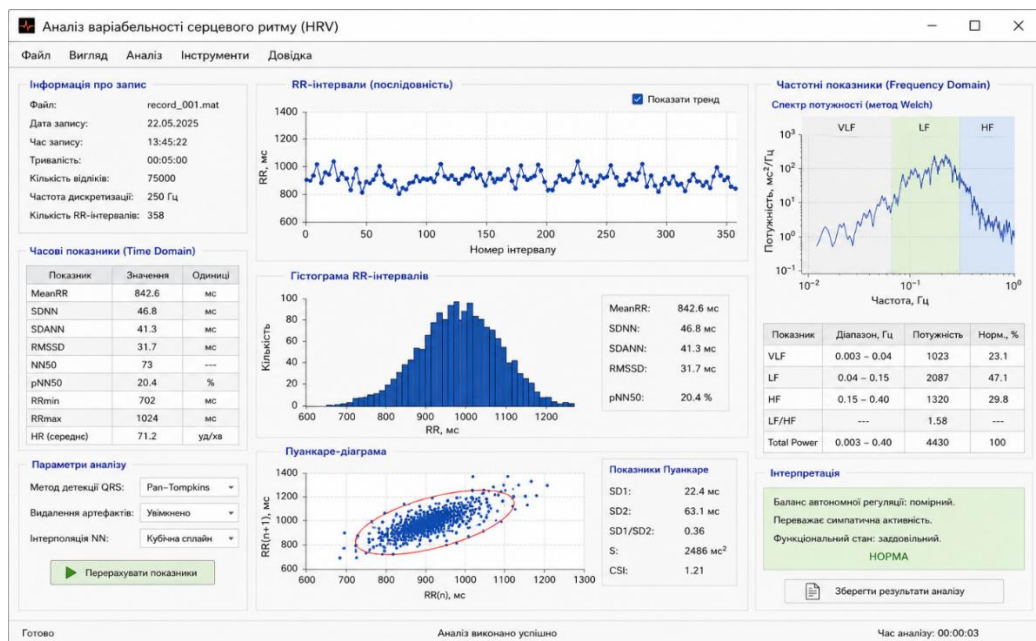


Рисунок Б.4 – Вікно аналізу варіабельності серцевого ритму

У вікні відображаються розраховані часові та спектральні показники варіабельності серцевого ритму.

Основні параметри:

- MeanRR;
- SDNN;
- RMSSD;
- pNN50;
- LF;
- HF;
- LF/HF.

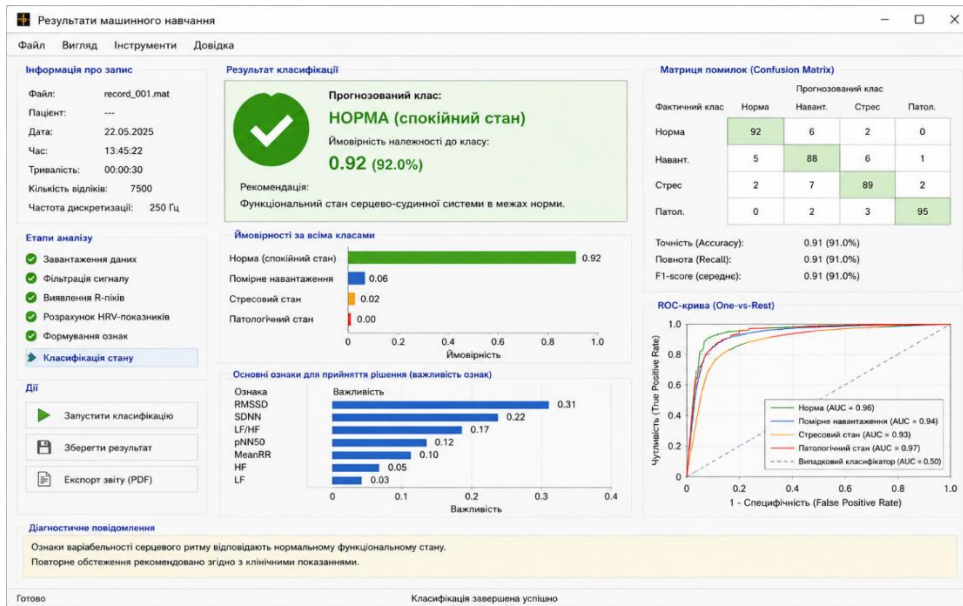


Рисунок Б.5 – Вікно результатів машинного навчання

Після завершення аналізу система виконує класифікацію функціонального стану серця та відображає отриманий результат.

У вікні відображаються:

- прогнозований клас;
- ймовірність належності до класу;
- діагностичне повідомлення;
- рекомендації щодо подальшого обстеження.

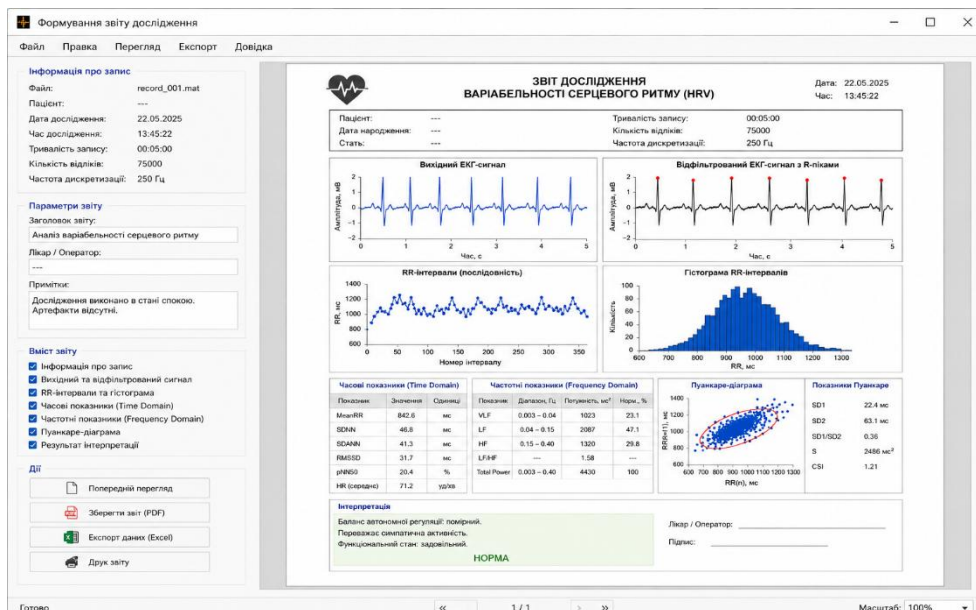


Рисунок Б.6 – Вікно формування звіту дослідження

Дана форма призначена для формування та збереження результатів дослідження у вигляді електронного звіту.

Функції:

- збереження результатів;
- експорт у формат PDF;
- друк звіту;
- архівування даних пацієнта.

**База даних результатів досліджень**

Файл Правка Вигляд Пошук Інструменти Довідка

Пошук і фільтри

Пошук ПІБ / ІД пацієнта:

Вивести текст...

Період дослідження:

З: 01.05.2025

По: 22.05.2025

Стать:

Усі

Результат класифікації:

Усі

Лікар / Оператор:

Усі

Показати лише обрані записи

**Список досліджень**

ID	ПІБ пацієнта	Дата дослідження	Стать	Вік	MeanRR, мс	SDNN, мс	RMSSD, мс	rNN50, %	LF, мс <sup>2</sup>	HF, мс <sup>2</sup>	LF/HF	Клас (результат)	Імовірність	Примітки
20502-001	Коваленко Ірина Валентина	22.05.2025 13:45	Ч	45	842.6	48.8	31.7	20.4	2087	1320	1.58	Норма	0.92	---
20502-002	Петренко Олег Петрович	22.05.2025 11:20	Ч	38	760.4	32.1	18.6	11.2	1456	1128	1.29	Норма	0.88	---
20501-015	Сидоренко Марія Сергіївна	21.05.2025 16:05	Ж	52	915.2	60.3	39.8	25.6	1820	1945	0.94	Норма	0.93	Фізі. навант.
20501-014	Коваленко Андрій Васильович	21.05.2025 09:40	Ч	60	688.1	28.7	16.2	9.4	1120	980	1.14	Покірне навантаження	0.81	---
20500-011	Бондаренко Ольга Іванівна	20.05.2025 14:30	Ж	49	801.5	41.5	26.9	16.8	1678	1532	1.09	Норма	0.90	---
20509-009	Валентин Сергій Михайлович	19.05.2025 12:15	Ч	57	642.7	24.3	13.1	6.6	980	720	1.36	Стрес	0.77	---
20508-007	Мельник Лариса Олександрівна	18.05.2025 10:50	Ж	44	872.3	53.6	33.2	21.1	2010	1680	1.20	Норма	0.91	---
20507-004	Григорук Дмитро Олександрович	17.05.2025 15:25	Ч	35	704.2	29.4	16.9	10.3	1260	1050	1.20	Покірне навантаження	0.79	Після трен.
20506-003	Лисенко Ірина Валентина	16.05.2025 09:55	Ж	41	930.4	62.2	42.1	27.5	2210	2050	1.08	Норма	0.94	---
20505-001	Шевченко Павло Костянтинович	15.05.2025 13:10	Ч	48	669.8	26.1	14.7	7.9	1050	820	1.28	Стрес	0.73	---

Усього записів: 125

**Детальні інформації про обраний запис**

Основна інформація | Показники HRV | Графіки | Результат класифікації | Примітки

ID запису: 20502-002

ПІБ пацієнта: Петренко Олег Петрович

Дата дослідження: 22.05.2025 11:20:33

Стать: Чоловік

Вік: 38

Зріст: 178 см

Вага: 76 кг

Лікар / Оператор: Касюк Д.Р.

Файл запису: res\_002\_002.maf

Примітка запису: 00:00:00

Частота дискретизації: 250 Гц

Часові показники (Time Domain)			Частотні показники (Frequency Domain)		
Показник	Значення	Одиниця	Показник	Значення	Середня
MeanRR	760.4	мс	VLF	0.003 - 0.04	1023 мс <sup>2</sup>
SDNN	32.1	мс	LF	0.04 - 0.15	1456 мс <sup>2</sup>
RMSSD	18.6	мс	HF	0.15 - 0.40	1128 мс <sup>2</sup>
rNN50	11.2	%	LF/HF	1.29	---
RRmin	612	мс	Total Power	0.003 - 0.40	2584 мс <sup>2</sup>
RRmax	948	мс			
HR (середнє)	78.9	уд/хв			

**Результат класифікації**

Клас: Норма (оптимальний стан)

Імовірність: 0.88 (88.0%)

Діагноз / Інтерпретація:  
Більше автономного регулювання; помірно.  
Переважає симпатична активність.  
Функціональний стан: задовільний.

Готово

Поточний користувач: Касюк Д.Р.

22.05.2025 14:00:12

Рисунок Б.7 – Вікно бази даних результатів досліджень

У даному вікні забезпечується доступ до результатів попередньо проведених досліджень.

Відображувані дані:

- ПІБ пацієнта;
- дата дослідження;
- показники HRV;
- результат класифікації;
- примітки оператора.

Розроблений графічний інтерфейс користувача забезпечує зручну взаємодію оператора з програмно-апаратним комплексом аналізу ритміки серця

та дозволяє виконувати повний цикл обробки електрокардіографічних сигналів – від їх реєстрації до формування діагностичного висновку. Модульна структура інтерфейсу сприяє підвищенню зручності експлуатації комплексу та ефективності роботи користувача.