

**СУЧАСНІ МЕТОДИ ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА
СЕРЦЕВО-СУДИННОЮ АКТИВНІСТЮ**

Вступ

Серцево-судинні захворювання (ССЗ) належать до провідних причин смертності у світі та є одними з найпоширеніших патологій людського організму [1–4]. Своєчасна діагностика та профілактика ССЗ набувають особливої актуальності, а сучасні технології дозволяють реалізовувати інноваційні методи моніторингу та аналізу фізіологічних показників у реальному часі. Перехід від реактивного підходу до профілактичної, персоналізованої та прогностичної медицини передбачає постійне спостереження за серцевою активністю, що підвищує ефективність виявлення відхилень і запобігає критичним станам. Розробка портативних систем моніторингу серцевої діяльності дозволяє проводити безперервну діагностику у будь-яких умовах, відкриваючи нові можливості для клінічного застосування та індивідуального контролю здоров'я.

Методика розробки портативної системи моніторингу серцевої діяльності

Портативна комп'ютеризована система моніторингу серцевої діяльності людини спроектована для роботи у декількох режимах, що забезпечують комплексний контроль за станом серцевих ритмів. Кожен режим виконує специфічні функції збору, обробки та передачі даних, що дозволяє отримувати точну та наочну інформацію про стан серця [5, 6]. Блок-схема роботи продемонстровано на рис. 1.

Режим збору даних забезпечує неперервне отримання сигналів із сенсорів протягом заданого інтервалу часу. ЕКГ-сигнал надходить до мікроконтролера, де виконується попередня цифрова обробка: фільтрація перешкод (смуговий фільтр 0,5 - 40 Гц, notch-фільтр 50 Гц), нормалізація та формування часових рядів із мітками часу. Після цього дані структуруються у форматі JSON і готуються до передачі на віддалений сервер для зберігання та аналізу.

Передача даних реалізується за моделлю «пристрій – сервер – лікар». Пристрій через Wi-Fi надсилає дані до серверної частини медичної інформаційної системи, де вони зберігаються та стають доступними сімейному лікарю через захищений веб-інтерфейс. Концептуально така модель подібна до eHealth, однак у запропонованій реалізації передбачено персоналізований доступ конкретного лікаря на основі електронної згоди пацієнта.

Ключовим аспектом є криптографічний захист. Серед протоколів, що застосовуються для захисту передавання даних, виділяють SSL (застарілий і небезпечний), TLS 1.0–1.2 (із підтримкою симетричного шифрування AES), TLS 1.3 (сучасний стандарт із примусовим використанням стійких алгоритмів), IPSec (захист на мережевому рівні), а також HTTPS як реалізацію HTTP поверх TLS. Для IoT-рішень поширеним є MQTT із TLS або DTLS для UDP-з'єднань.

У межах TLS 1.3 застосовується гібридна криптографічна схема:

– асиметричне шифрування (RSA або алгоритм обміну ключами ECDHE на основі еліптичних кривих) використовується під час handshake для безпечного формування спільного сеансового ключа;

- симетричне шифрування (AES-256-GCM або ChaCha20-Poly1305) забезпечує швидке шифрування основного потоку даних;
- хеш-функції (SHA-256/384) гарантують цілісність повідомлень;
- механізм Perfect Forward Secrecy унеможливує розшифрування раніше перехопленого трафіку навіть у разі компрометації приватного ключа.

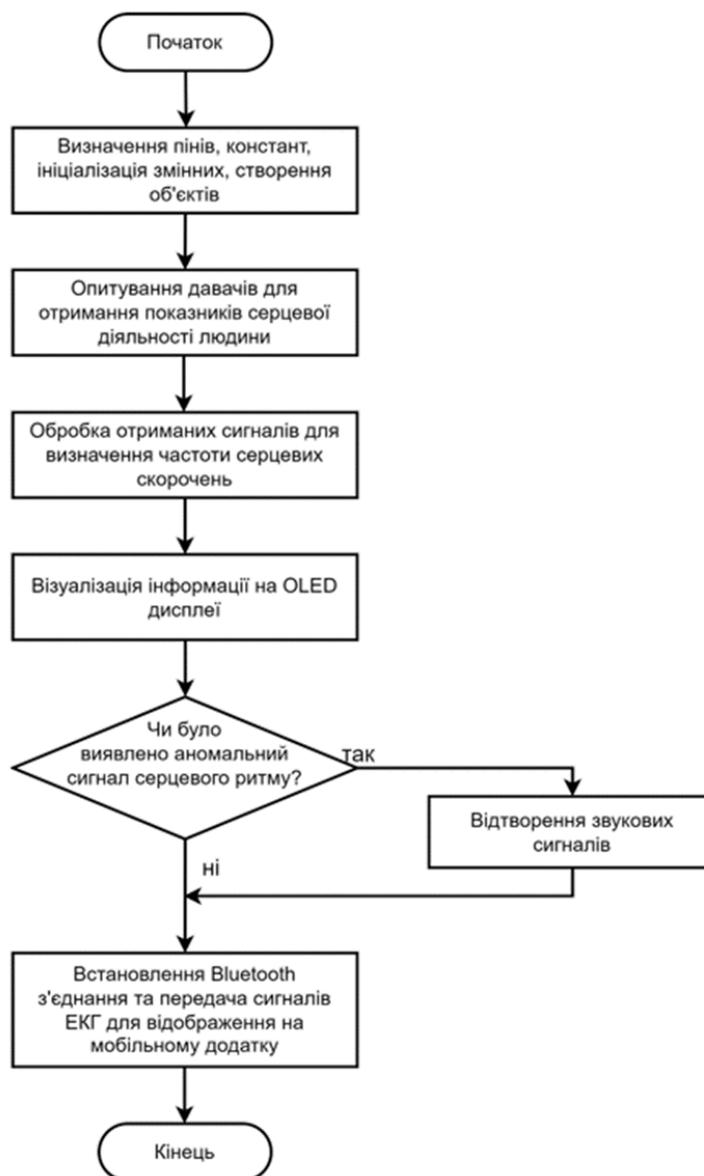


Рис. 1. Блок-схема алгоритму роботи системи

Процес дешифрування відбувається на сервері шляхом використання відповідного сеансового ключа, сформованого під час криптографічного обміну. Таким чином забезпечуються конфіденційність, автентичність і цілісність медичних даних. З огляду на криптостійкість і мінімізований час встановлення з'єднання, оптимальним вибором для системи є HTTPS або MQTT поверх TLS 1.3.

Для передачі телеметрії може використовуватися брокер повідомлень Eclipse Mosquitto із шифруванням TLS 1.3. Зберігання даних доцільно реалізувати у хмарному середовищі з безкоштовним тарифом, наприклад Firebase (Spark Plan). У цьому випадку ЕКГ-дані передаються через HTTPS-запити до Realtime Database або Cloud Firestore, а доступ лікаря

забезпечується через автентифікацію (OAuth 2.0) та рольову модель доступу. Роботу алгоритму передачі даних продемонстровано рис. 2.

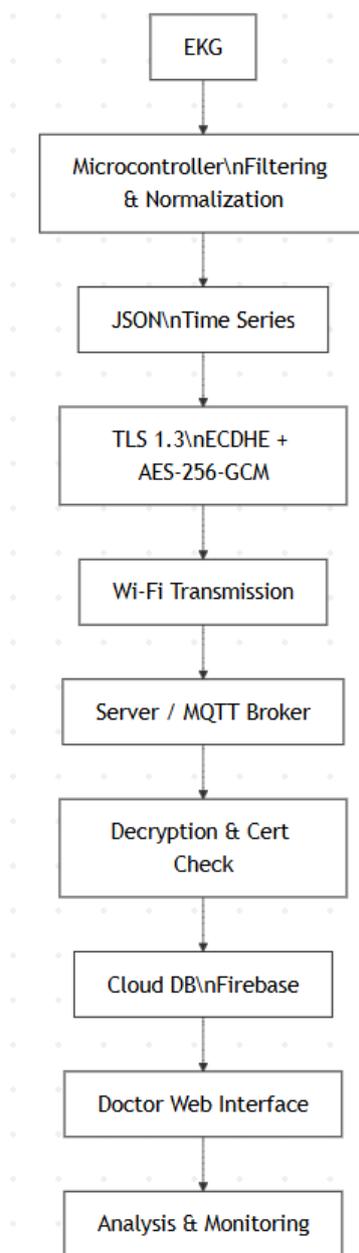


Рис. 2. Архітектура системи збору та захищеної передачі ЕКГ-даних

Сенсор AD8232 є спеціалізованим підсилювачем для зняття біопотенціалів серця. Він працює за принципом реєстрації електричних імпульсів, що виникають при збудженні серцевого м'яза.

Основна формула для вихідного сигналу:

$$V_{out}(t) = G * V_{ECG}(t) \quad (1)$$

де, $V_{out}(t)$ – вихідна напруга сигналу (мВ), $V_{ECG}(t)$ – реальний біоелектричний потенціал серця (мВ), G – коефіцієнт підсилення (для AD8232 типовий коефіцієнт становить від 100 до 1000).

Режим відображення даних забезпечує візуалізацію сигналів на OLED-дисплеї високої роздільної здатності. Система відображає цифрові та графічні показники, що дозволяє користувачу оцінювати стан серцевої діяльності безпосередньо на пристрої. Висока якість візуалізації робить інформацію доступною для швидкого та ефективного контролю [8].

Режим передачі даних реалізований через бездротові інтерфейси Bluetooth та Wi-Fi. Це дозволяє надсилати оброблені дані на зовнішні пристрої, такі як смартфони або персональні комп'ютери, забезпечуючи віддалений моніторинг та можливість подальшого збереження і аналізу даних у базі для довготривалого спостереження.

Режим сповіщення призначений для сигналізації про критичні зміни у параметрах серцевої діяльності. Звуковий генератор миттєво інформує про потенційно небезпечні стани, що сприяє своєчасній реакції та запобігає серйозним ускладненням.

Робота системи реалізована за допомогою багатоступеневого алгоритму (рис.3).

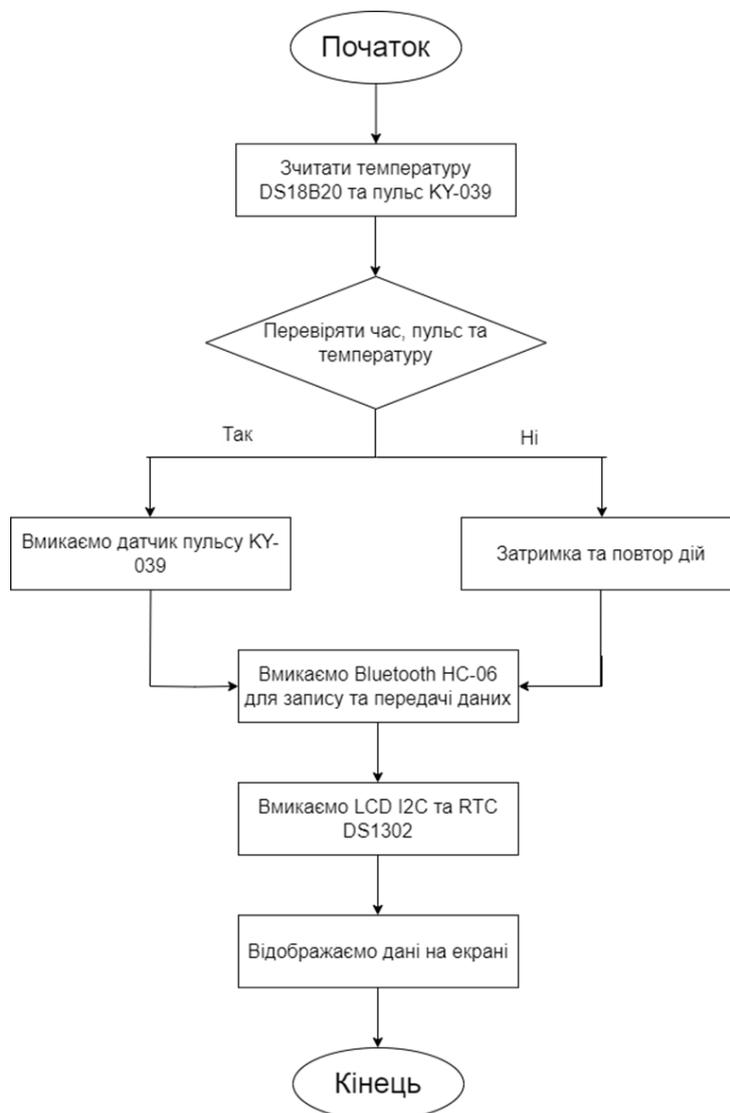


Рис. 3. Алгоритм роботи системи

Підготовка та налаштування середовища розробки

Для розробки програмної частини системи було створено стабільне та відтестоване середовище, яке включає сучасні інструменти програмування, бібліотеки та середовища виконання. Основною мовою обрано Python, що забезпечує високу гнучкість у роботі з даними, інтеграцію з веб-технологіями та реалізацію алгоритмів машинного навчання [9, 10]. Python дозволяє швидко розробляти як серверну логіку, так і аналітичні модулі, одночасно забезпечуючи доступ до великої кількості готових бібліотек для обробки сигналів, статистичного аналізу та візуалізації.

Інтерфейс користувача реалізовано за допомогою HTML, CSS та JavaScript, що забезпечує сучасний веб-дизайн та інтерактивну візуалізацію даних. За допомогою Flask створено серверну частину веб-застосунку, яка обробляє запити, маршрутизує дані та керує комунікацією між фронтендом і базою даних. Локальне зберігання інформації про користувачів та пацієнтів здійснюється у форматі JSON, що дозволяє швидко серіалізувати дані та забезпечує їхню просту інтеграцію з хмарними сервісами.

Для аналітичної обробки медичних сигналів використано бібліотеки машинного навчання, зокрема scikit-learn та PyTorch. Вони дозволяють класифікувати сигнали ЕКГ, виявляти аномалії та прогнозувати потенційні відхилення серцевої діяльності. Реалізація алгоритмів включає нормалізацію вхідних сигналів, побудову часових рядів, обчислення статистичних та спектральних характеристик та навчання моделей на реальних даних. Завдяки Python програмне забезпечення може динамічно підключати нові алгоритми аналізу без необхідності кардинальних змін архітектури.

Середовище розробки Visual Studio Code забезпечує інтеграцію з Git для контролю версій, автодоповнення коду, налагодження, роботу з віртуальними середовищами та ізоляцію залежностей. Це дозволяє підтримувати структуровану та ефективну розробку програмного забезпечення, де кожний модуль тестується окремо, а зміни не впливають на стабільність системи.

Програмна реалізація для ESP32 є ключовим елементом системи, оскільки він виконує роль центрального обчислювального модуля. Код для ESP32 створюється у середовищі Arduino IDE і побудований за принципом модульного програмування. Кожен модуль відповідає за окрему функцію: обробку сигналів ЕКГ та пульсометра, передачу даних через Wi-Fi або Bluetooth, шифрування та інтеграцію з серверною частиною системи. Такий підхід дозволяє гнучко масштабувати систему, підключати нові сенсори та алгоритми аналізу без необхідності повної переробки програмного забезпечення.

У результаті програмна архітектура забезпечує надійну роботу системи у реальному часі, інтегрує аналітичні та веб-компоненти, а також дозволяє легко підключати лікаря до моніторингу стану пацієнта через захищені канали зв'язку.

Особливості реалізації

Асинхронна обробка: багатопоточність дозволяє одночасно збирати, обробляти та передавати дані.

Безпечна передача: шифрування комунікацій та автентифікація підключення забезпечують захист персональних даних.

Логування та контроль стану сенсорів: своєчасне виявлення збоїв і відновлення роботи системи.

Інтерактивна веб-система та мобільний додаток.

Веб-застосунок реалізовано за архітектурою MVC. Серверна частина на Flask приймає дані від ESP32, зберігає їх у базі та обробляє для відображення. Фронтенд на HTML/CSS/JS відображає графіки та показники у браузері користувача, забезпечуючи інтерактивний аналіз.

Мобільний додаток Bluetooth Graphics дозволяє підключитися до ESP32 через Bluetooth, отримувати дані у реальному часі та візуалізувати їх на смартфоні (рис.4). Це забезпечує повний цикл моніторингу: збір, обробку, передачу та візуалізацію інформації про серцеву діяльність.

Тестування та фізична реалізація

Прототип системи виконано у компактному корпусі з модулем ESP32, OLED-дисплеєм, сенсорами та акумуляторним живленням. Конструкція забезпечує портативність, автономність і точність вимірювань (рис. 4).



Рис. 4. Фізичний вигляд пристрою

Сенсор AD8232 відповідає за збір біопотенціалів серця здійснює вимірювання параметрів серцевих ритмів за допомогою фотоплетизмографії. Модуль microSD дозволяє зберігати дані для подальшого аналізу. Результат вимірювання показано на рис. 5.

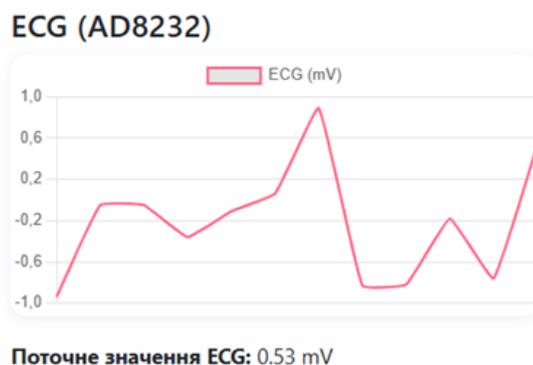


Рис. 5. Покази датчиків

Система забезпечує відображення графічних та цифрових параметрів на дисплеї, звукову сигналізацію, бездротову передачу даних та інтеграцію з веб- і мобільними застосунками, створюючи повноцінне рішення для моніторингу серцевої діяльності людини.

Висновки

У ході дослідження проаналізовано та розроблено портативний апаратно-програмний комплекс для моніторингу серцевої діяльності на основі мікроконтролера ESP32. Проаналізовано сучасні технології контролю серцевих показників і обґрунтовано доцільність використання бездротових рішень для дистанційного спостереження. Реалізовано алгоритми обробки сигналів, що забезпечують зменшення впливу шумів і підвищення достовірності результатів. Експериментальні випробування підтвердили працездатність і потенційну придатність розробленої системи для застосування в персональній телемедицині та біомедичних дослідженнях.

Список літератури:

1. B. S. Dzundza, I. T. Kohut, V. I. Holota, L. V. Turovska, and M. V. Deichakivskiy, "Principles of Construction of Hybrid Microsystems for Biomedical Applications," *Phys. Chemistry Solid State*, vol. 23, no. 4, pp. 776–784, Dec. 2022. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.776-784>.
2. I. T. Kogut, B. S. Dzundza, V. I. Holota, O. I. Bulbuk, V. V. Fedoriuk, and L. I. Nykyruy, "Modeling of integrated signal converters for biomedical sensor microsystems," *Phys. Chemistry Solid State*, vol. 24, no. 3, pp. 515–519, Sep. 2023. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.24.3.515-519>.
3. I. Kogut *et al.*, "Cyber-physical System for Monitoring and Analyzing Human Biomedical Data," *Advances Cyber-Physical Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 32–38, May 2024. doi: <https://doi.org/10.23939/acps2024.01.032>.
4. I. Chaikovsky, A. Popov, D. Fogel, and A. Kazmirchuk, "Development of AI-based method to detect the subtle ECG deviations from the population ECG norm," *Eur. J. Preventive Cardiol.*, vol. 28, Supplement_1, May 2021. doi: <https://doi.org/10.1093/eurjpc/zwab061.229>.
5. I. A. Chaikovsky, M. A. Primin, and A. P. Kazmirchuk, "Development and implementation in medical practice of new information technologies and metrics for the analysis of subtle changes in the electromagnetic field of the human heart," *Visnik Nac.' Acad.' Nauk Ukraini*, no. 02, pp. 33–43, Feb. 2021. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2021.02.033>.
6. M. Bocharov *et al.*, "Assessment of the activities physiological cost of the defense forces officers in Ukraine using miniature ECG device," *Front. Cardiovasc. Med.*, vol. 10, Oct. 2023. doi: <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1239128>.
7. I. A. Chaikovsky *et al.*, "Mild myocardial injury during percutaneous coronary intervention based on minor changes on electrocardiogram and heart rate variability," *World J. Cardiol.*, vol. 17, no. 12, Dec. 2025. doi: <https://doi.org/10.4330/wjc.v17.i12.112141>.
8. I. Chaikovsky *et al.*, "Subtle changes on electrocardiogram in severe patients with COVID-19 may be predictors of treatment outcome," *Frontiers Artif. Intell.*, vol. 8, Mar. 2025. doi: <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1561079>.
9. D. O. Dziuba, O. O. Syvoraksha, I. A. Tchaikovsky, O. V. Khavryuchenko, V. V. Solovyov, and O. A. Loskutov, "Long-term electrocardiographic monitoring in a cardiac surgery hospital: modern views and experience of application of telemonitoring system after coronary stenting," *EMERG. MED.*, vol. 17, no. 1, pp. 38–43, Apr. 2021. doi: <https://doi.org/10.22141/2224-0586.17.1.2021.225718>
10. G. Georgieva-Tsaneva, E. Gospodinova, and K. Cheshmedzhiev, "Examination of Cardiac Activity with ECG Monitoring Using Heart Rate Variability Methods," *Diagnostics*, vol. 14, no. 9, p. 926, Apr. 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/diagnostics14090926>.

Надійшла до редколегії 17.11.2025

Відомості про авторів:

Павлюк Мирослав Федорович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: myroslav.pavliuk@cnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5663-2918>

Мартинюк Віталій Васильович – магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: vitalii.martyniuk@cnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4310-6302>