

В.І. ГОЛОТА, канд. техн. наук, В.О. ПОЛІНЯЄВ, В.В. МАРТИНЮК

МЕТОДИ БАГАТОРІВНЕВОГО АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЧНИХ СИГНАЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ

Вступ

У статті представлено розробку програмного комплексу для цифрової обробки та автоматизованої класифікації сигналів електрокардіограм (ЕКГ). Використано методи вейвлет-перетворення для формування спектрограм та згорткові нейронні мережі для класифікації сигналів. Розглянуто архітектуру системи, алгоритми обробки даних, інтерфейс користувача, а також методи оцінки ефективності програмного продукту [1-4]. Проведено порівняльний аналіз варіантів реалізації основних функцій із обґрунтуванням вибору оптимальних технічних рішень. Результати демонструють високий рівень точності та надійності системи, що підтверджує її готовність до використання в клінічній практиці.

Вимоги та функціональні можливості системи

Розроблена система передбачає виконання ключових функцій: завантаження даних ЕКГ конкретного пацієнта, відображення сигналу на екрані та автоматизовану класифікацію із відображенням результатів аналізу. Основні вимоги до програмного продукту включають здатність коректно обробляти сигнали ЕКГ різної тривалості та формату, відображати спектрограм, що дозволяє візуально оцінити динаміку серцевого циклу; надавати лікарю можливості записувати виявлений діагноз поряд із автоматично визначеним результатом та зберегти результатів обробки для подальшого аналізу та формування історії пацієнта.

Блок-схема роботи програми показана на рис. 1.

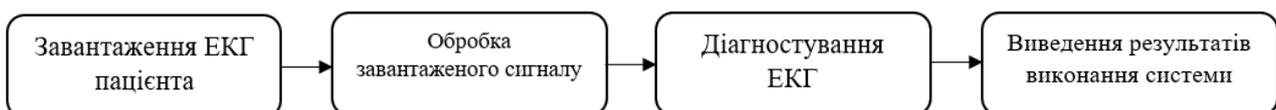


Рис. 1. Блок-схема роботи системи

На схемі видно послідовність дій від завантаження ЕКГ до обробки сигналу та збереження результатів у базі даних. Така організація процесу дозволяє ефективно інтегрувати систему у клінічну практику та мінімізує ймовірність помилок при введенні даних. Архітектура системи продемонстрована на рис. 2.

Початковий сигнал ЕКГ є одновимірним часовим рядом. Для ефективного аналізу його необхідно перетворити у двовимірну частотно-часову форму [5]. У роботі використано неперервне вейвлет-перетворення, що дозволяє створювати спектрограми з характерними ознаками для здорових та патологічних станів серця (рис.3).

Для кожного пацієнта розглядаються три основні серцеві відведення, що дозволяє оцінити різні аспекти електричної активності серця. Три спектрограми накладаються в одне зображення з трьома каналами, яке подається на вхід згорткової нейронної мережі (рис.4).

Цей підхід дозволяє одночасно аналізувати всі основні відведення, що підвищує точність розпізнавання сигналів різних патологій [6].

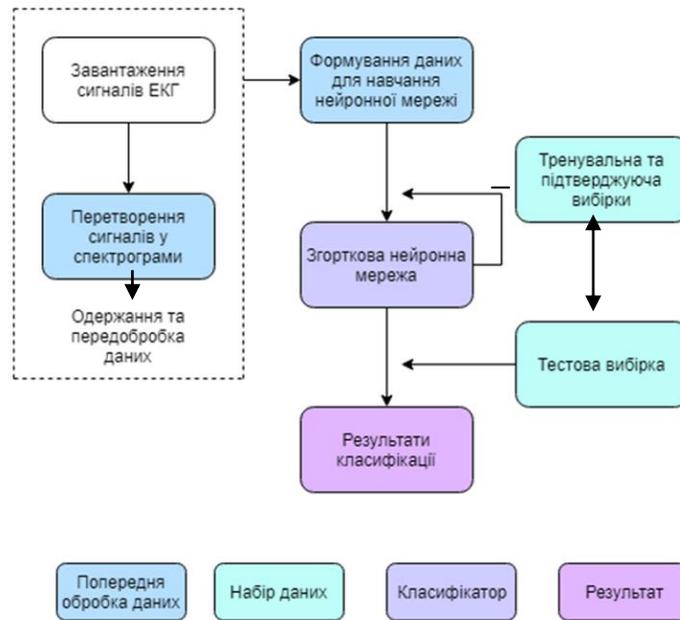


Рис. 2. Архітектура системи та алгоритми обробки сигналів

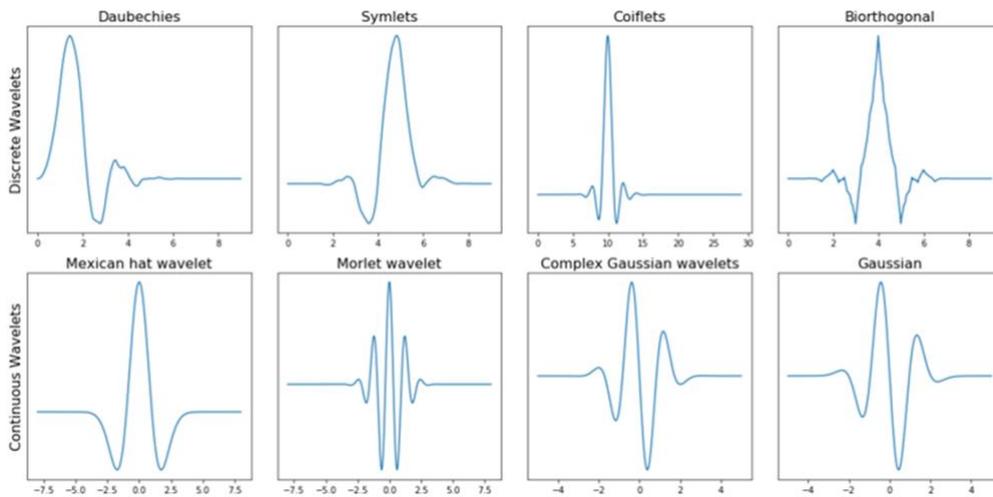


Рис. 3. Види сигналів ЕКГ вейвлетів

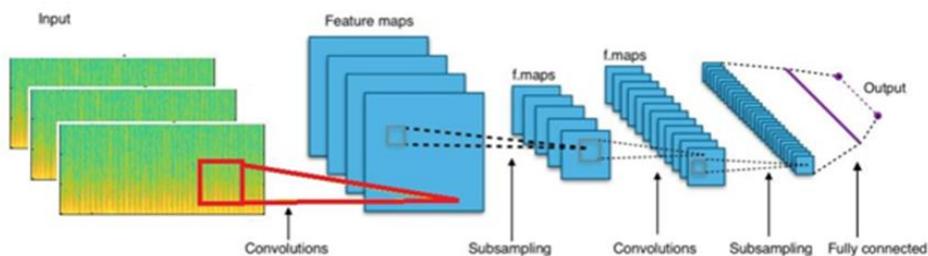


Рис. 4. Формування триканального зображення

Згорткова нейронна мережа складається з послідовних згорткових та підсумовуючих шарів, завершуючись повнозв'язним та вихідним шаром для класифікації сигналів (рис.5).

Така архітектура забезпечує здатність виділяти характерні ознаки сигналів та високий рівень точності класифікації.

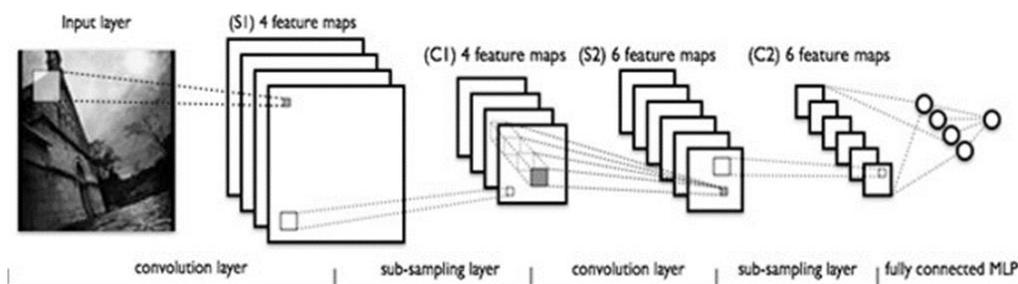


Рис. 5. Архітектура CNN

Оцінка роботи мережі показала високі результати: точність класифікації склала 92%, специфічність – 90%, чутливість – 94%. Це підтверджує правильність обраної архітектури та параметрів навчання.

Інтерфейс реалізовано із застосуванням бібліотеки Qt. Головне вікно програми містить кнопку «Завантажити ЕКГ», яка відкриває сигнал пацієнта з трьома основними відгалуженнями. Після завантаження відображаються дані пацієнта: ПІБ, вік та дата дослідження, що забезпечує зручність роботи з медичними даними.

Натискання кнопки «Обробити ЕКГ» активує алгоритм цифрової обробки сигналу та класифікації [7, 8]. На екрані з'являється ймовірний діагноз, який може бути доповнений власним висновком лікаря. Після підтвердження результатів користувач може зберегти їх у базі даних та обробити новий сигнал без перезапуску програми (рис.6).

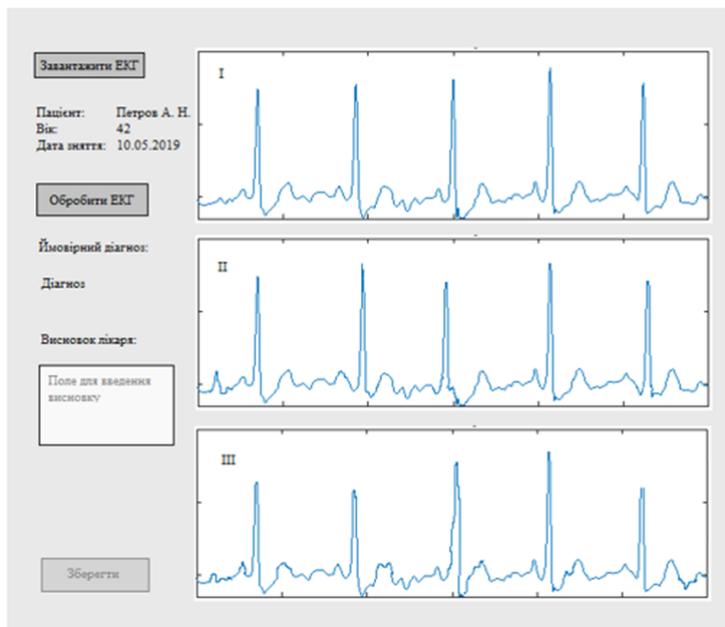


Рис. 6. Дані пацієнта та результат аналізу

Такий підхід забезпечує інтеграцію автоматизованого аналізу з професійною оцінкою лікаря, що підвищує надійність діагностики.

Для оцінки програмного продукту використано функціонально-вартісний аналіз (ФВА), що дозволяє визначити оптимальні технічні рішення та раціонально використовувати ресурси (рис.7). Основні функції системи включають вибір мови програмування, методу обробки сигналів, методу класифікації та технології інтерфейсу.



Рис. 7. Морфологічна карта програмного продукту

Аналіз варіантів реалізації функцій показав, що оптимальні комбінації включають Python для обчислень, перетворення Фур'є для обробки сигналів, CNN для класифікації та сучасний графічний інтерфейс (рис.8). Всі показники системи за швидкістю, обсягом пам'яті, часом обробки та обсягом коду відповідають вимогам [9, 10].

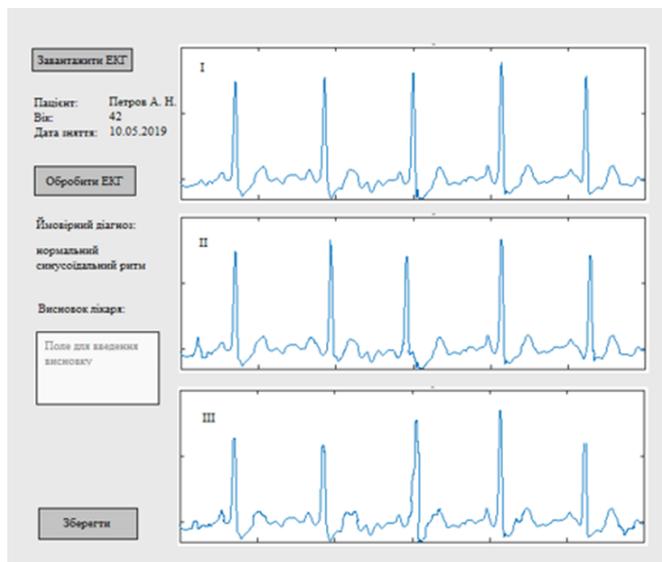


Рис. 8. Графічна оцінка параметрів

Експертне оцінювання параметрів проведено методом попарного порівняння, коефіцієнт узгодженості $W=0,75$ підтверджує достовірність результатів. Порівняльний аналіз показав, що обрана комбінація варіантів реалізації забезпечує максимальну якість та ефективність продукту.

Висновки

Розроблено програмний комплекс для цифрової обробки та автоматизованої класифікації сигналів ЕКГ із високою точністю. Використання вейвлет-перетворення та CNN дозволяє виділяти характерні ознаки сигналів, а зручний графічний інтерфейс забезпечує ефективність роботи користувачів. Економічне обґрунтування та експертна оцінка підтверджують раціональність обраної архітектури та технологій. Програмний продукт готовий до впровадження у клінічну практику для підтримки прийняття рішень при діагностиці серцево-судинних захворювань

Список літератури:

1. Mnevets, A.V., & Ivanushkina, N.G., "Neural Networks Detection of Low-Amplitude Components on ECG Using Modified Wavelet Transform," *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, no. 97, pp. 46–57, 2024. doi: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.97.46-57>
2. Software for Statistical Processing and Modeling of a Set of Synchronously Registered Cardio Signals of Different Physical Nature / S. Lupenko et al. *Computer Modeling and Intelligent Systems*. 2021. Vol. 2864. P. 194–205. doi: <https://doi.org/10.32782/cmis/2864-17>.
3. Dzundza, B.S., Kohut, I.T., Holota, V.I., Fedoriuk, V.V., & Nykyruy, L.I., "Principles of Construction of Hybrid Microsystems for Biomedical Applications," *Physics and Chemistry of Solid State*, vol. 23, no. 4, pp. 776–784, 2022. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.776-784>.
4. Electrocardiogram Classification Using Wavelet Transformations / I. Krak et al. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 25–29 February 2020. 2020. doi: <https://doi.org/10.1109/tcset49122.2020.235573>.
5. Lee J.-A., Kwak K.-C. Heart Sound Classification Using Wavelet Analysis Approaches and Ensemble of Deep Learning Models. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 21. P. 11942. doi: <https://doi.org/10.3390/app132111942>.
6. Modeling of integrated signal converters for biomedical sensor microsystems / I. T. Kogut et al. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2023. Vol. 24, no. 3. P. 515–519. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.24.3.515-519>.
7. Electrocardiographic signal analysis using wavelet transforms / G. S. Kumari et al. 2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO), Visakhapatnam, 24–25 January 2015. 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/eesco.2015.7253688>.
8. Cyber-physical System for Monitoring and Analyzing Human Biomedical Data / I. Kogut et al. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2024. Vol. 9, no. 1. P. 32–38. doi: <https://doi.org/10.23939/acps2024.01.032>.
9. Darsana P., Kumar V. N. Extracting Fetal ECG Signals through a Hybrid Technique Utilizing Two Wavelet-Based Denoising Algorithms. *IEEE Access*. 2023. P. 1. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3308409>.
10. Mostovoy Y. M., Danilevych T. D. Predictors of heart rhythm disorders in the patients with severe COVID-infection. *Reports of Vinnytsia National Medical University*. 2020. Vol. 24, no. 4. P. 640–646. URL: [https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2020-24\(4\)-14](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2020-24(4)-14).

Надійшла до редколегії 20.11.2024

Відомості про авторів:

Голота Віктор Іванович - кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Україна; email: viktor.holota@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4605-7507>.

Поліняєв Владислав Олександрович - магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Україна; email: vladyslav.poliniaev.20@pnu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7413-0751>.

Мартинюк Віталій Васильович – магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Україна; email: vitalii.martyniuk.20@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4310-6302>.