

**ЦИФРОВИЙ МЕДИЧНИЙ ФОНЕНДОСКОП З АЛГОРИТМАМИ ОБРОБКИ ТА  
АНАЛІЗУ БІОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ**

**Вступ**

Серцево-судинні та респіраторні захворювання залишаються провідними причинами смертності, що зумовлює необхідність підвищення ефективності ранньої діагностики. Традиційна аускультация, незважаючи на широке застосування, характеризується суб'єктивністю оцінювання та відсутністю можливості об'єктивного документування результатів [1-3]. У контексті розвитку e-Health та телемедицини актуальним є створення доступних цифрових рішень для обробки, візуалізації та дистанційної передачі біоакустичних сигналів. Тому розробка апаратно-програмного комплексу цифрового медичного фонендоскопа, сумісного з телемедицинськими системами, є важливим науково-технічним завданням сучасної біомедицинської інженерії.

**Архітектура та апаратна структура системи**

Сучасні тенденції розвитку медичної техніки характеризуються активною цифровізацією діагностичних засобів. Традиційний акустичний фонендоскоп поступово трансформується у цифрову систему реєстрації, обробки та аналізу біоакустичних сигналів. Основною перевагою такого підходу є можливість об'єктивізації результатів аускультативної архівування даних, проведення спектрального аналізу та автоматизованого виявлення патологічних змін.

Біоакустичні сигнали серця і легень мають складну часову та частотну структуру. Їх параметри змінюються залежно від фізіологічного стану пацієнта, наявності патологій, вікових особливостей та умов реєстрації [4]. Застосування цифрових алгоритмів дозволяє підвищити інформативність дослідження шляхом фільтрації шумів, підсилення корисного сигналу та автоматичного визначення характерних ознак.

Цифровий медичний фонендоскоп є інтегрованою апаратно-програмною системою, що складається з акустичного сенсора, підсилювача, аналого-цифрового перетворювача, мікроконтролерного блоку обробки, модуля передачі даних та програмного забезпечення для візуалізації й аналізу сигналів.

Акустичний сенсор реалізується на основі електретного мікрофона або п'єзоелектричного перетворювача, який забезпечує перетворення механічних коливань у електричний сигнал. Попередній підсилювач формує необхідний рівень амплітуди та мінімізує вплив електромагнітних завад. Аналого-цифровий перетворювач здійснює дискретизацію сигналу з частотою, достатньою для коректного відтворення спектра серцевих та легневих шумів. Загальну схему продемонстровано на рис. 1.

Мікроконтролер або вбудований процесор виконує цифрову обробку сигналів у режимі реального часу. Для забезпечення мобільності пристрою використовуються бездротові інтерфейси передачі даних, що дозволяють інтегрувати систему з персональними комп'ютерами, мобільними пристроями та медичними інформаційними платформами (рис. 2) [5].

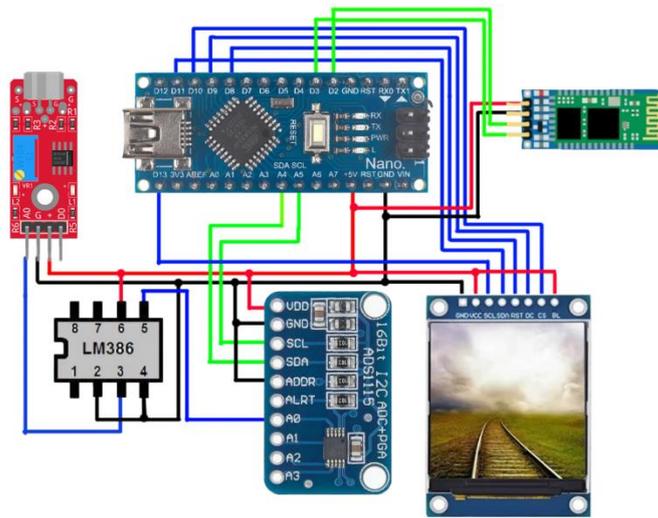


Рис. 1. Структурна схема цифрового фонендоскопа

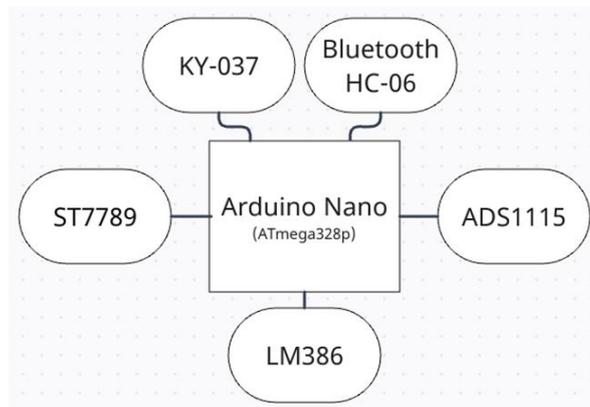


Рис. 2. Функціональна схема взаємодії апаратних модулів

### Характеристика біоакустичних сигналів

Серцеві тони формуються внаслідок закриття клапанів і турбулентного руху крові. Вони мають переважно низькочастотний спектр із чіткою періодичністю. Патологічні шуми відзначаються ширшим частотним діапазоном і нерегулярністю амплітудних характеристик.

Легеневі звуки характеризуються складною спектральною структурою, що змінюється залежно від фази дихального циклу. Вони можуть містити як безперервні шумові компоненти, так і короточасні імпульсні сигнали (рис. 3, рис. 4).

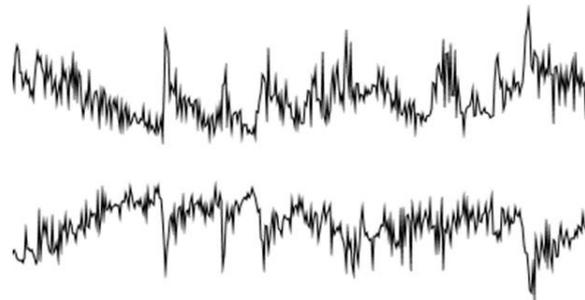


Рис. 3. Приклад часової форми серцевого сигналу

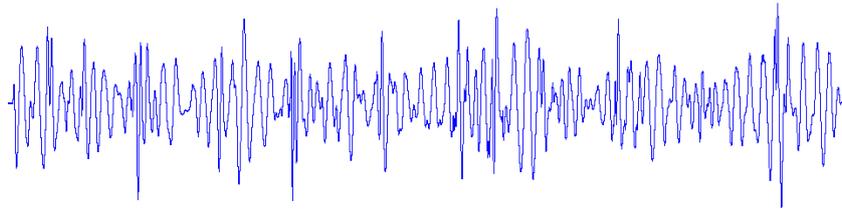


Рис. 4. Спектрограма легеневого сигналу

Аналіз часової форми сигналу дозволяє визначити тривалість, амплітуду та періодичність тонів [6, 7]. Спектральний аналіз дає змогу дослідити розподіл енергії за частотами та виявити характерні пікові компоненти. Важливим є врахування впливу зовнішніх шумів, рухових артефактів і контактних перешкод.

### Алгоритми цифрової обробки

Цифрова обробка сигналів включає попередню фільтрацію, нормалізацію, сегментацію та виділення інформативних ознак. На першому етапі застосовуються смугові цифрові фільтри для усунення низькочастотних і високочастотних завад. Далі виконується масштабування амплітуди та усунення постійної складової.

Сегментація дозволяє виділити окремі серцеві цикли або дихальні фази. Після цього здійснюється аналіз енергетичних характеристик і формування спектральних представлень. Отримані параметри використовуються для подальшої класифікації стану пацієнта.

Застосування методів машинного навчання дозволяє автоматизувати процес інтерпретації. Модель класифікації навчається на розмічених наборах даних і здатна визначати характерні ознаки патологічних станів.

### Програмне забезпечення та інтерфейс

Програмна частина системи забезпечує відображення часових графіків, спектрограм та узагальнених діагностичних показників. Інтерфейс користувача повинен бути інтуїтивно зрозумілим і забезпечувати швидкий доступ до архіву досліджень (рис. 5)

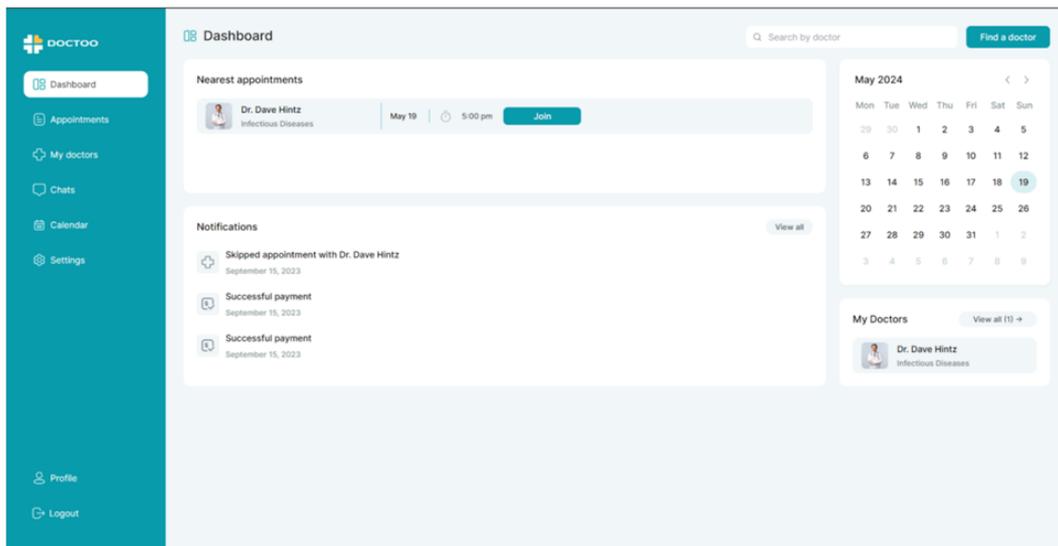


Рис. 5. Приклад інтерфейсу програмного забезпечення

Збереження даних у структурованій базі дозволяє формувати електронну історію спостережень [8]. Інтеграція з хмарними сервісами забезпечує можливість дистанційного аналізу та телемедичного консультування (рис. 6).

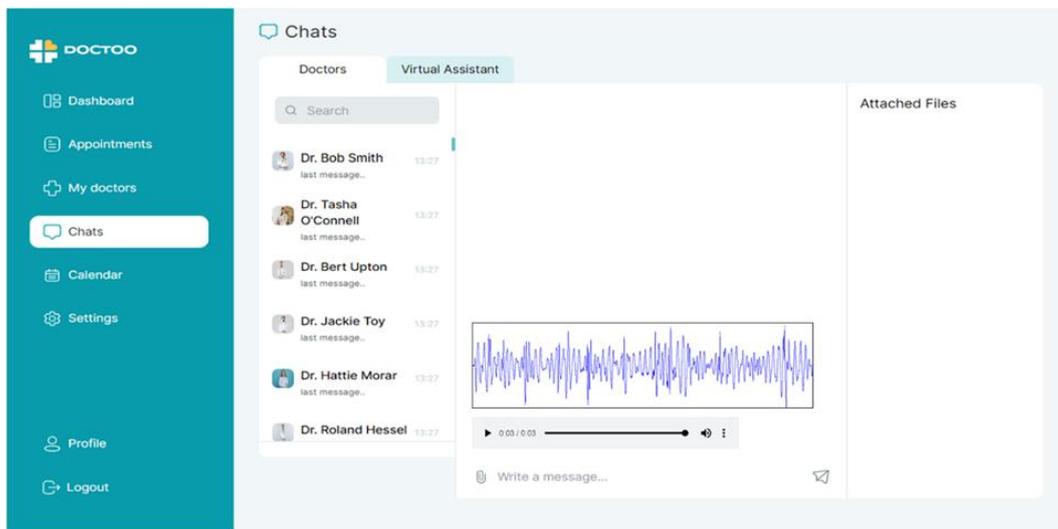


Рис. 6. Надсилання звуку та звукової хвилі пацієнта

### Клінічне та освітнє значення

Цифровий фонендоскоп підвищує об'єктивність аускультатії та мінімізує вплив людського фактору [9, 10]. Він може використовуватися у віддалених регіонах для дистанційної передачі даних спеціалістам.

### Висновки

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки: цифровий медичний фонендоскоп з алгоритмами обробки та аналізу біоакустичних сигналів є перспективним інструментом сучасної діагностики. Використання цифрових методів фільтрації, спектрального аналізу та автоматизованої класифікації створює передумови для раннього виявлення патологій та розвитку телемедицини. Комплексний підхід до проектування апаратної та програмної частин забезпечує високу функціональність, масштабованість і практичну цінність системи.

### Список літератури:

1. V. Geroimenko, Ed., *Augmented Reality and Artificial Intelligence*. Cham: Springer Nat. Switz., 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-27166-3>.
2. K. S. Malakhov, "Insight into the Digital Health System of Ukraine (eHealth): Trends, Definitions, Standards, and Legislative Revisions," *Int. J. Telerehabil.*, vol. 15, no. 2, Dec. 2023. doi: <https://doi.org/10.5195/ijt.2023.6599>.
3. B. S. Dzundza, I. T. Kohut, V. I. Holota, L. V. Turovska, and M. V. Deichakivskyi, "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>.
4. 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>.
5. . 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>.
6. B. Dzundza, S. Dombrovskyi, M. Shtun, O. Chinchoy, and A. Morgun, "oftware Processing Features of Photoplethysmography Signals," *Phys. Chemistry Solid State*, vol. 26, no. 1, pp. 105–110, Mar. 2025. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.26.1.105-110>.
7. 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>.
8. T. Doi *et al.*, "Decreased cholinesterase level combined with renal dysfunction and sympathetic denervation associated with increased cardiac mortality in systolic heart failure," *Front. Cardiovasc. Med.*, vol. 10, Sep. 2023. doi: <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1131282>.

9. 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>.

10. 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>.

*Надійшла до редколегії 17.10.2025*

*Відомості про авторів:*

**Когут Ігор Тимофійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: [ihor.kohut@pnu.edu.ua](mailto:ihor.kohut@pnu.edu.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5524-1790>

**Шкварок Назарій Васильович** – магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: [nazarii/shkvarok.20@pnu.edu.ua](mailto:nazarii/shkvarok.20@pnu.edu.ua)

**Комаришин Тарас Ігорович** – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: [taras.komaryshyn.25@pnu.edu.ua](mailto:taras.komaryshyn.25@pnu.edu.ua); ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1178-8146>