

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-40>

УДК 621.396

НАУМЕНКО ВІКТОРІЯ

Національний аерокосмічний університет «ХАІ»

<https://orcid.org/0000-0002-5291-6032>e-mail: v.naumenko@khai.edu**ТОЦЬКИЙ ОЛЕКСАНДР**

Національний аерокосмічний університет «ХАІ»

<https://orcid.org/0000-0003-3966-0746>e-mail: totskiyalexander@gmail.com**ПІДЧЕНКО СЕРГІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9488-1782>e-mail: sergpchn@gmail.com**АКУЛИНІЧЕВ АРТЕМ**

Харківський національний університет радіоелектроніки

<https://orcid.org/0000-0002-2105-1603>e-mail: artem.akulynichev@nure.ua

АНАЛІЗ СФІГМОГРАМ ЗА ДОПОМОГОЮ БІАМПЛІТУДИ

В роботі розглянуті результати аналізу восьми тестових сфігмограм, як за допомогою ~~ж~~ добре відомих методів, таких як аналіз часових інтервалів, швидкості пульсової хвилі та стандартного спектрального аналізу, так і за допомогою запропонованих нових методів біспектрального аналізу, включно з аналізом кількості локальних максимумів біамплітуд. Встановлено, що оцінювання розподілу локальних максимумів біамплітуд може використовуватись як новий перспективний інтегральний показник відхилень стану серцево-судинної системи від норми.

Ключові слова: біспектр, біамплітуда, сфігмограма.

NAUMENKO VIKTORIYA

National Aerospace University «KhAI»

TOTSKY OLEXANDER

National Aerospace University «KhAI»

PIDCHENKO SERGIY

Khmelnytskyi National University

ACULYNICHEV ARTEM

Kharkiv National University of Radio Electronics

ANALYSIS OF SPHYGMOGRAMS USING BIAMPLITUDE

This paper explores the application of bispectral analysis, specifically the biamplitude representation, for studying sphygmograms—pulse waveforms used in non-invasive cardiovascular diagnostics. Traditional diagnostic indicators such as Pulse Transit Time (PTT) and Pulse Wave Velocity (PWV) often suffer from significant limitations, particularly in noisy conditions, low signal clarity, and dependence on dual-sensor synchronization. In contrast, the use of higher-order statistical methods such as the bispectrum allows for the analysis of nonlinear phase relationships and interactions between frequency components that are typically inaccessible through conventional second-order spectral methods. The study conducted a comparative analysis of eight sphygmogram recordings, collected from individuals of various ages and physiological states, including both healthy and at-risk subjects. Standard spectral methods and time-based features failed to deliver consistent and interpretable results for all recordings, especially when the waveforms lacked distinct characteristics. However, biamplitude distributions demonstrated strong diagnostic potential, with the number, magnitude, and relative spacing of local maxima providing useful insights into cardiovascular dynamics. In particular, this method showed the ability to detect subtle pathological changes in pulse waves that may be obscured in conventional analyses. It also offers improved noise immunity, making it suitable for real-world conditions such as mobile or wearable health monitoring systems. The paper concludes that biamplitude-based bispectral analysis can serve as an effective supplementary tool for assessing cardiovascular health, enabling early detection of abnormalities even when traditional metrics fail or are unavailable. Further research is recommended to develop clinical thresholds and integrate biamplitude metrics into multimodal diagnostic systems.

Keywords: bispectrum, biamplitude, sphygmogram

Стаття надійшла до редакції / Received 21.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Аналіз сфігмограм з використанням оцінювання статистики третього порядку – біамплітуди є перспективним напрямом у дослідженні серцево-судинної системи (ССС). Сфігмограма відображає пульсову хвилю, яка поширюється артеріями, і містить інформацію про стан серцево-судинного русла людини. Традиційні методи аналізу сфігмограм часто обмежуються оцінкою часових та частотних характеристик сигналу, що не враховує нелінійні взаємозв'язки між компонентами сигналу.

Існує актуальна потреба в розробці методів більш поглибленого аналізу сфігмограм, які б враховували нелінійні властивості серцево-судинної системи та забезпечували більш детальну оцінку стану СССР з використанням нових завадостійких інформаційних ознак. Біамплітудний аналіз, який є

частиною біспектрального аналізу, дозволяє, по-перше, виділити і досліджувати нові завадостійкі інформаційні ознаки, які породжені фазовими взаємозв'язками між гармоніями сигналу та, по-друге, виявляти нелінійні взаємодії, що принципово не доступні при використанні лише класичного спектрального аналізу.

Аналіз досліджень та публікацій

Існує кілька найпоширеніших підходів, що використовують для аналізу сфінгограм. Аналіз часових інтервалів (Pulse Transit Time - РТТ) [1-3] та швидкості пульсової хвилі (Pulse Wave Velocity - РWV) [4-7] є найбільш розповсюдженими підходами, заснованими на вимірюванні часових затримок між характерними точками – часовими відліками біомедичного сигналу. Такі підходи відзначаються відносною простотою, але мають ряд недоліків: чутливість до точності детектування точок [8, 9]; низьку завадостійкість через наявність шумів та присутність артефактів у сигналі, який вимірюють. Значний вплив, при використанні цих підходів має тонус судин, активність вегетативної нервової системи тощо. Відомі підходи потребують ~~вимагають~~ частого повторення калібрування та синхронізації вимірювань у двох точках [10], а також вимагають складних процедур попередньої обробки сигналу.

Окрім перерахованих вище найпоширеніших підходів у останні роки з'явилося багато робіт, у яких використовуються нейронні мережі як інструмент для виявлення унікальних характеристик медичних сигналів, у тому числі і сигналів пульсової хвилі. Наприклад, глибокі згорткові нейронні мережі (CNN) для класифікації станів ефективно вилучають інформативні ознаки з фотоплетизмографічних (PPG) сигналів [11-13], а рекурентні нейронні мережі (LSTM, BiLSTM) широко використовуються для аналізу PPG-сигналів [14 - 16]. Однак, методи на основі нейронних мереж потребують великої кількості якісних маркованих даних для навчання та значних обчислювальних ресурсів. Крім того, такі моделі часто є «чорними скриньками», що ускладнює інтерпретацію результатів у медичних застосуваннях.

Класичний спектральний аналіз не знайшов широкого застосування для подібних задач. Спектральний аналіз добре працює тільки для стаціонарних сигналів, а сфінгограма відображає пульсовою нестационарною хвилею, яка має періодичну, але змінну форму в залежності від багатьох факторів, наприклад, від фази стану судинної системи або рухів пацієнтів. Також спектральна щільність містить лише амплітуди частот, а фазова інформація, яка є важливою для коректної інтерпретації вимірів безповоротно втрачена у енергетичному спектрі. Чутливість до артефактів [17] (рухи, шуми, неправильна фіксація датчика) значно впливає на кінцевий результат.

У цьому контексті зростає зацікавленість до новітніх методів, які здатні поєднати високу інформативність сигналу з ефективністю обробки – в першу чергу, з завадостійкістю. Одним із таких перспективних напрямів є метод біспектрального оцінювання сигналів пульсової хвилі, який дозволяє аналізувати нелінійні взаємозв'язки у сигналі та виявляти приховані патологічні зміни з високою чутливістю та під впливом завад.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: дослідити можливості застосування методу на основі оцінювання біамплітуди для аналізу сфінгограм для виявлення відхилень від норми та покращення точності оцінки фізіологічного стану пацієнта, з урахуванням нелінійних характеристик сигналів пульсової хвилі та впливу завад.

Виклад основного матеріалу

Біспектр [18] - це статистична характеристика третього порядку, яка дозволяє виявляти складні залежності у сигналі, які недоступні для традиційних методів спектрального аналізу другого порядку, таких як кореляційна функція чи спектральна густина. Біспектр розраховують як таке осереднене значення добутку Фур'є-компонент:

$$\dot{B}_x(p, q) = \left\langle \dot{X}^{(m)}(p) \dot{X}^{(m)}(q) \dot{X}^{*(m)}(p + q) \right\rangle, \quad (1)$$

де $p, q = -I+1, \dots, I+1$ – це індекси відліків у частотній області; $\langle \dots \rangle$ – це процедура осереднення за ансамблем реалізацій.

Дискретне перетворення Фур'є m -тої довільної реалізації сигналу $\{x(m) (i)\}$ представимо як

$$\dot{X}^{(m)}(p) = \sum_{i=0}^{I-1} x^{(m)}(i) \exp(-j2\pi i p). \quad (2)$$

Спектральна густина (спектральна щільність):

$$G(p) = \langle \dot{X}^{(m)}(p) \dot{X}^{*(m)}(p) \rangle, \quad (3)$$

де $*$ означає комплексну спряженість.

Порівняння спектральної (3) та біспектральної щільності (1) дозволяє відзначити, що спектральна щільність (3) є статистичним середнім значенням добутку комплексно спряжених перетворень Фур'є (2) на одній і тій самій частоті p , тоді як біспектр (1) – це статистичне середнє добутку перетворень Фур'є на частотах p, q та комплексно спряженого перетворення Фур'є на частоті $p + q$.

Отже, спектральна щільність відображає автокореляційні властивості процесу на фіксованій

частоті, тоді як біспектральна щільність характеризує взаємкореляційні властивості процесу на різних частотах. На відміну від спектра, біспектр здатний виявляти асиметрію та нелінійність, які не видно з аналізу статистичних спектральних оцінок другого порядку.

Для проведення дослідження було вибрано вісім сфінгограм людей різних вікових категорій та різного стану здоров'я. Реєстрація сфінгограм здійснювалась сфінгографічною системою на основі кварцового сенсора надлишкового тиску з модульованим міжелектродним зазором збудження резонатора [19]. На рис. 1,а-8,а наведено залежності пульсового тиску у часі. Як можна бачити з наведених графіків на основі деяких тестових даних неможливо порахувати РТТ через відсутність явного піку, що відповідає за відбиту хвилю. Однак, виконати аналіз за допомогою спектральної та біспектральної щільності можливо навіть у таких випадках. Спектр тестових сфінгограм представлено на рис. 1,б-8,б, а вигляд біамплітуд на рис. 1,в-8,в. У Таблиці 1 наведено зведені результати розрахунків.

Як видно з наведених графіків та Таблиці 1 розрахунки РТТ та РВВ для складних випадків виявилися неможливими. Спектральний аналіз є обмежено інформативним, в тому сенсі, що сфінгосигнал має дуже вузьку смугу частот і майже однакову амплітуду для усіх тестових випадків з варіаціями від 0.44 до 0.66. За обраними інформативними ознаками спектральної щільності не можливо однозначно відповісти на питання щодо відхилення від норми.

В свою чергу, біспектральний аналіз надає можливість аналізу сигналів пульсової хвилі ~~тестові~~ з більшою інформативністю та завадостійкістю. Якщо отримана біамплітуда має показник максимуму більше 300 одиниць (конкретно для даного пристрою вимірювання та його незмінних налаштувань), то сфінгосигнал містить складні фазові та частотні взаємозв'язки, які є домінуючими. Присутність великої кількості локальних максимумів свідчить про наявність у сигналі додаткових взаємопов'язаних компонент, що обумовлених відхиленням тестових вимірів від норми.

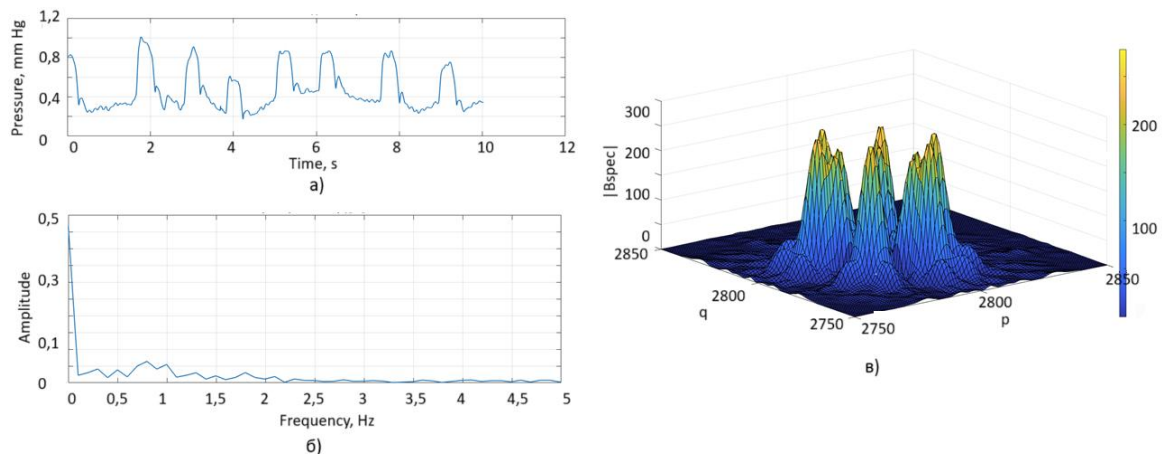


Рис. 1. Тестовий запис Serhii 75.msrf: а) – сфінгограма; б) – спектр, в) – біамплітуда

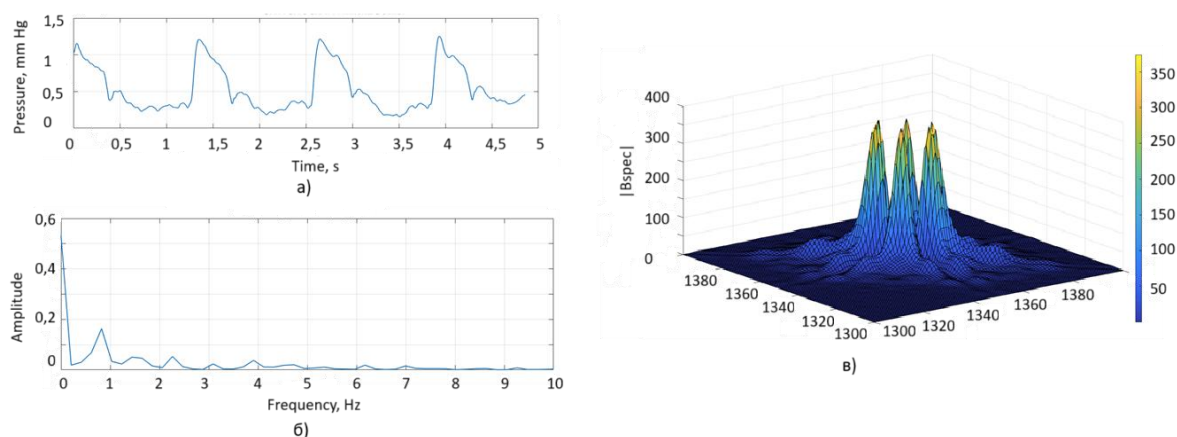


Рис. 2. Тестовий запис Mykola 36.msrf: а) – сфінгограма; б) – спектр, в) – біамплітуда

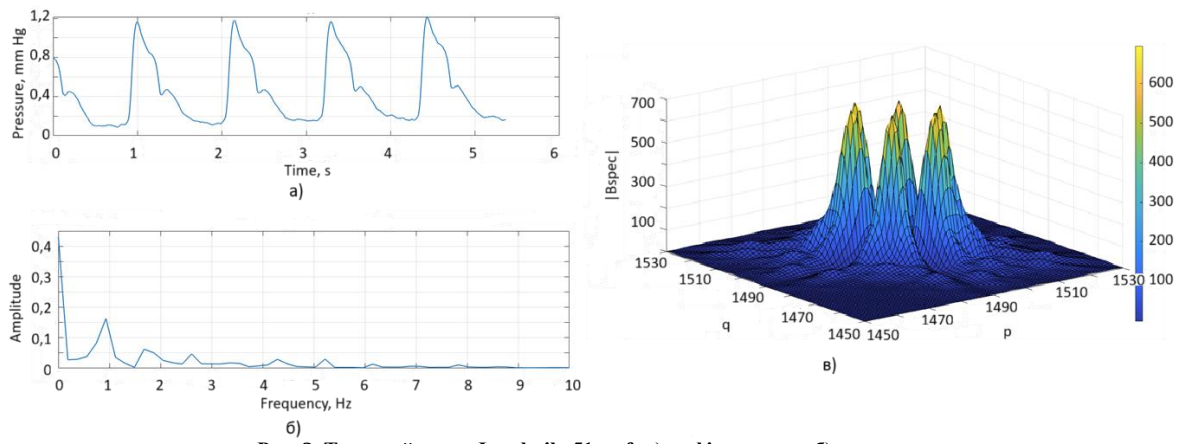


Рис. 3. Тестовий запис Lyudmila 51.ms: а) – сфігмограма; б) – спектр, в) – біамплітуда

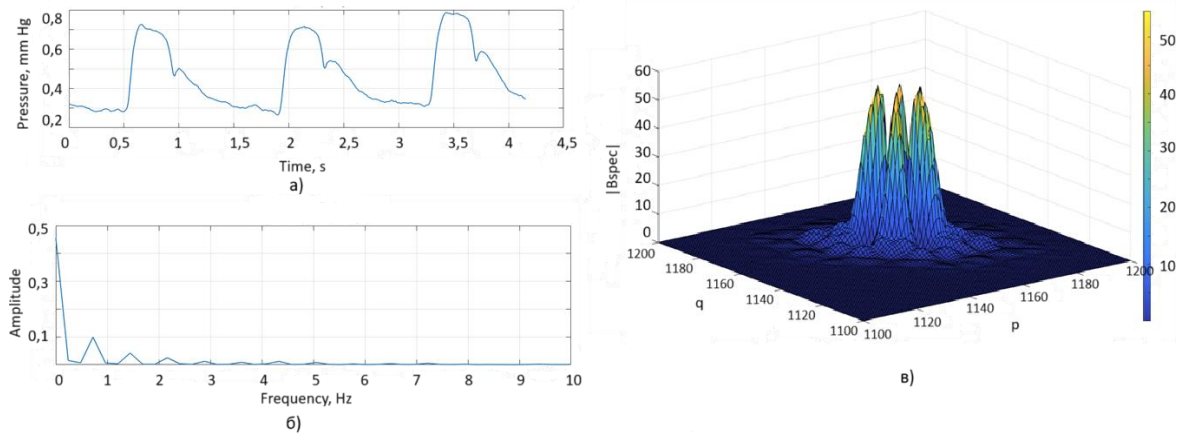


Рис. 4. Тестовий запис Volodymyr 68.ms: а) – сфігмограма; б) – спектр, в) – біамплітуда

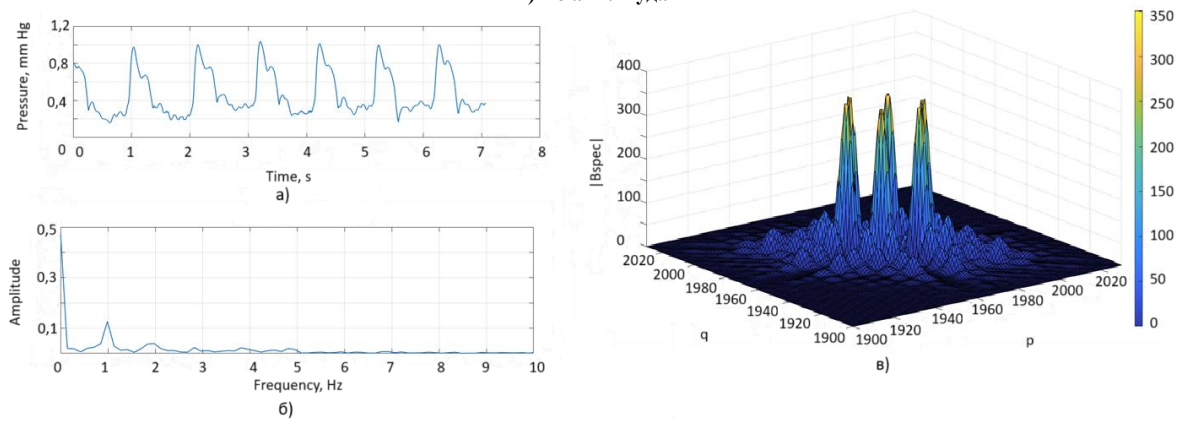


Рис. 5. Тестовий запис Vika.ms: а) – сфігмограма; б) – спектр, в) – біамплітуда

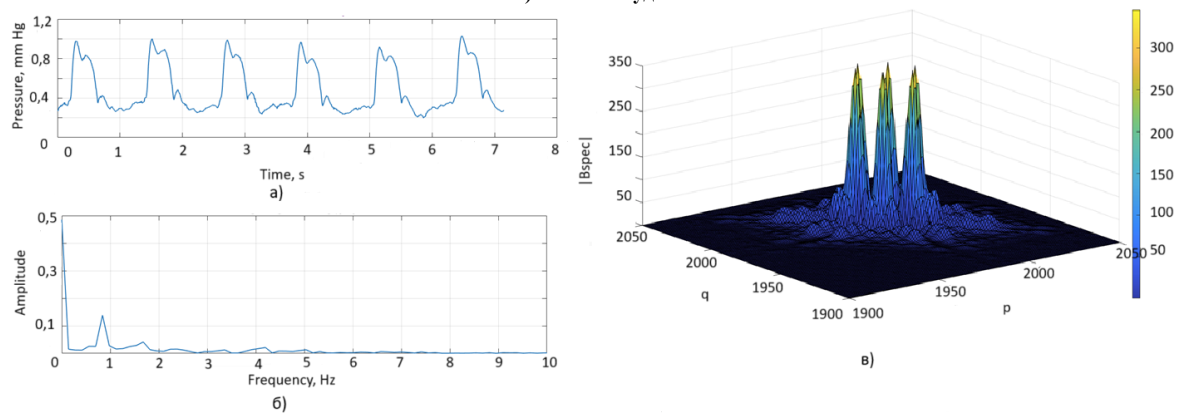


Рис. 6. Тестовий запис Tatyana.ms: а) – сфігмограма; б) – спектр, в) – біамплітуда

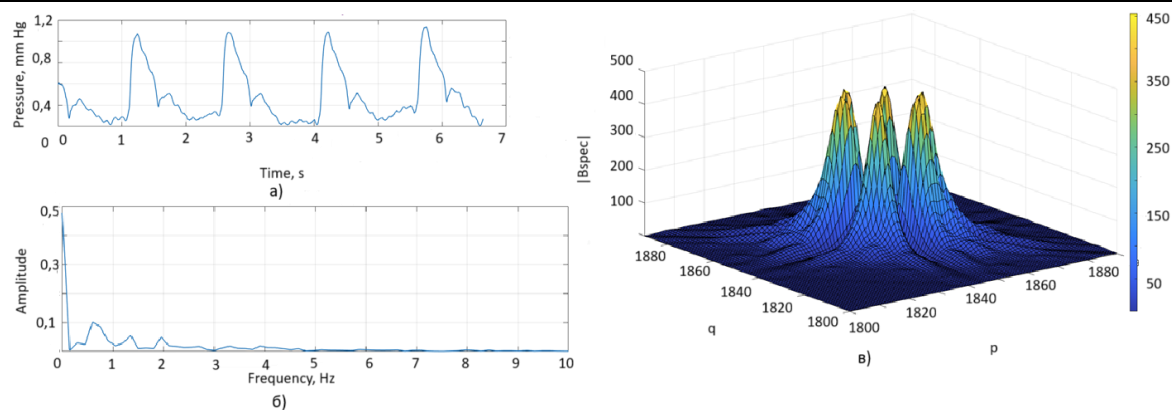


Рис. 7. Тестовий запис Nikita.msf: а) – сфігмограма; б) – спектр, в) – біамплітуда

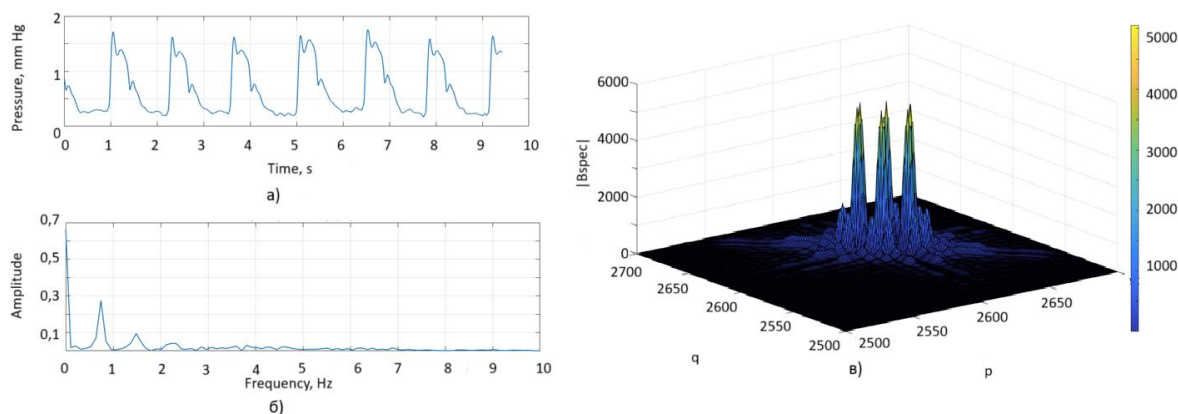


Рис. 8. Тестовий запис Aleksandra.msf: а) – сфігмограма; б) – спектр, в) – біамплітуда

Таблиця 1

Результати розрахунків

Тестовий запис	Максимум біамплітуди	Кількість локальних максимумів (більше 1% від глобального максимуму)	Максимум спектральної щільності	Ширина спектру (на 50%), Гц	РТТ, с
Serhii 75.msf	278.1843	30	0.4669	0.049	-
Mykola 36.msf	373.8261	14	0.5321	0.103	0.1422
Lyudmila 51.msf	693.6556	10	0.4314	0.093	-
Volodymyr 68.msf	54.5326	6	0.4559	0.075	-
Vika.msf	351.0227	42	0.4717	0.07	0.2142
Tany.msf	345.9521	26	0.4853	0.065	0.1332
Nikita.msf	453.8306	6	0.4777	0.067	-
Aleksandra.msf	5065.1	46	0.6638	0.053	0.1712

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Досліджено вісім експериментальних записів сфігмограм для пацієнтів різного віку та статі. Розглянуті найбільш вживані методи аналізу сфігмограм, такі як аналіз часових інтервалів (РТТ) та швидкості пульсової хвилі (PWV), а також методи спектрального та біспектрального аналізу. З наведених у Таблиці 1 даних можна зробити висновок, що максимум біамплітуди та кількість локальних максимумів можна використовувати для виявлення додаткових інформативних біспектральних завадостійких ознак, з сфігмограм. Як перспективу, у подальших дослідженнях відзначимо необхідність виявлення зв'язків біспектральних інформативних ознак з патологіями, що спостерігають у функціонуванні серцево-судинної системи людини.

Література

1. Exploring pulse transit time as a potential indicator of blood pressure: a scientific inquiry

- [Електронний ресурс] / Tahar Omari [та ін.] // *Studies in Health Sciences*. – 2024. – Vol. 5, no. 4. – P. e11669. – Режим доступу: <https://doi.org/10.54022/shsv5n4-031>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 27.04.2025.
2. Abdullah S. A. Pulse transit time as an index of vascular reactivity [Електронний ресурс] / Sheamaa Ahmed Abdullah, Samar Imran Essa, Bassam Talib Al-Gailani // *Journal of the Pakistan Medical Association*. – 2024. – Vol. 74, no. 10 (Supple-08). – P. S356–S359. – Режим доступу: <https://doi.org/10.47391/jpma-bagh-16-81>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 27.04.2025.
3. Mol A. [та ін.]. Pulse transit time as a proxy for vasoconstriction in younger and older adults [Електронний ресурс] // *Experimental Gerontology*. – 2020. – Vol. 135. – P. 110938. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.exger.2020.110938>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 27.04.2025.
4. Pilz N. [та ін.]. Pulse Wave Velocity: Methodology, Clinical Applications, and Interplay with Heart Rate Variability [Електронний ресурс] // *Reviews in Cardiovascular Medicine*. – 2024. – Vol. 25, no. 7. – P. 266. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31083/j.rcm2507266>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 27.04.2025.
5. Steptoe A., Johnston D. The control of blood pressure using pulse-wave velocity feedback [Електронний ресурс] // *Journal of Psychosomatic Research*. – 1976. – Vol. 20, no. 5. – P. 417–424. – Режим доступу: [https://doi.org/10.1016/0022-3999\(76\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0022-3999(76)90004-0). – Назва з екрана. – Дата звернення: 27.04.2025.
6. Lapitan D. G. [та ін.]. Measurement of Pulse Wave Velocity Using Cuff Oscillometry and Toe Photoplethysmography [Електронний ресурс] // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russian Federation, 26–30 June 2023. – [S. l.], 2023. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/rsemw58451.2023.10202109>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 27.04.2025.
7. Zhong Q. [та ін.]. Carotid–Femoral Pulse Wave Velocity in the Prediction of Cardiovascular Events and Mortality: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis [Електронний ресурс] // *Angiology*. – 2017. – Vol. 69, no. 7. – P. 617–629. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1177/0003319717742544>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 27.04.2025.
8. Roy K., Chandran D. S., Deepak K. K. Regional Variation in Pulse Transit Time in the Upper Limb Arteries During Hypotensive and Non-hypotensive Lower Body Negative Pressure [Електронний ресурс] // *Cureus*. – 2025. – Режим доступу: <https://doi.org/10.7759/cureus.82752>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 27.04.2025.
9. Chen Y.-S. [та ін.]. Determinants of hand pulse wave velocity and hand pulse transit time in healthy adults [Електронний ресурс] // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14, no. 1. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60927-5>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 27.04.2025.
10. Rasool A. [та ін.]. Continuous and Noninvasive Blood Pressure Estimation by Two-Sensor Measurement of Pulse Transit Time [Електронний ресурс] // 2018 14th International Conference on Emerging Technologies (ICET), Islamabad, 21–22 November 2018. – [S. l.], 2018. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/icet.2018.8603612>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 27.04.2025.
11. Pankaj [та ін.]. Optimized deep neural network models for blood pressure classification using Fourier analysis-based time–frequency spectrogram of photoplethysmography signal [Електронний ресурс] // *Biomedical Engineering Letters*. – 2023. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s13534-023-00296-6>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 21.05.2025.
12. Kurylyak Y., Lamnaca F., Grimaldi D. A Neural Network-based method for continuous blood pressure estimation from a PPG signal [Електронний ресурс] // 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Minneapolis, MN, USA, 6–9 May 2013. – [S. l.], 2013. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/i2mtc.2013.6555424>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 21.05.2025.
13. Azar J. [та ін.]. Deep recurrent neural network-based autoencoder for photoplethysmogram artifacts filtering [Електронний ресурс] // *Computers & Electrical Engineering*. – 2021. – Vol. 92. – P. 107065. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107065>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 21.05.2025.
14. Ali M. [та ін.]. PPG based Noninvasive Blood Glucose Monitoring using Multi-view Attention and Cascaded BiLSTM Hierarchical Feature Fusion Approach [Електронний ресурс] // *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. – 2024. – P. 1–12. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/jbhi.2024.3464098>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 21.05.2025.
15. Gao H. [та ін.]. A LSTM-Based Realtime Signal Quality Assessment for Photoplethysmogram and Remote Photoplethysmogram [Електронний ресурс] // 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Nashville, TN, USA, 19–25 June 2021. – [S. l.], 2021. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/cvprw53098.2021.00424>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 21.05.2025.
16. Viunytskyi O. [та ін.]. Continuous cuffless blood pressure measurement using feed-forward neural network [Електронний ресурс] // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2023. – № 2. – С. 36–53. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.2.04>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 21.05.2025.
17. Guo R. [та ін.]. A General Applicable Sphygmogram Discriminator for Detecting Arrhythmia & Motion Artifact [Електронний ресурс] // *International Journal of Signal Processing Systems*. – 2016. – Vol. 4, no. 5. – P. 427–431. – Режим доступу: <https://doi.org/10.18178/ijsp.4.5.427-431>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 21.05.2025.

звернення: 25.05.2025.

18. Totsky A. V., Zelensky A. A., Kravchenko V. F. *Bispectral Methods of Signal Processing: Applications in Radar, Telecommunications and Digital Image Restoration*. – Berlin : De Gruyter GmbH, Walter, 2014. – 325 p. – ISBN 978-3-11-031716-7.

19. Taranchuk A., Pidchenko S. Quartz Pulse Wave Sensor With a Capacitive Control for Healthcare Solutions [Електронний ресурс] // *IEEE Sensors Journal*. – 2021. – Vol. 21, no. 6. – P. 8613–8620. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3049065>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 25.05.2025.

References

1. Omari T. Exploring pulse transit time as a potential indicator of blood pressure: a scientific inquiry / T. Omari, R. Benali, N. Dib, O. Behadada // *Studies in Health Sciences*. – 2024. – Vol. 5, № 4. – Art. e11669. – DOI: <https://doi.org/10.54022/shsv5n4-031>.
2. Abdullah S. A. Pulse transit time as an index of vascular reactivity / S. A. Abdullah, S. I. Essa, B. T. Al-Gailani // *Journal of the Pakistan Medical Association*. – 2024. – Vol. 74, № 10 (Suppl. 08). – P. S356–S359. – DOI: <https://doi.org/10.47391/jpma-bagh-16-81>.
3. Mol A. Pulse transit time as a proxy for vasoconstriction in younger and older adults / A. Mol, C.G.M. Meskers, S.P. Niehof, A.B. Maier, R.J.A. van Wezel // *Experimental Gerontology*. – 2020. – Vol. 135. – Art. 110938. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exger.2020.110938>.
4. Pilz N. Pulse Wave Velocity: Methodology, Clinical Applications, and Interplay with Heart Rate Variability / N. Pilz, V. Heinz, T. Ax, L. Fessler, A. Patzak, T.L. Bothe // *Reviews in Cardiovascular Medicine*. – 2024. – Vol. 25, № 7. – P. 266. – DOI: <https://doi.org/10.31083/j.rcm2507266>.
5. Steptoe A. The control of blood pressure using pulse-wave velocity feedback / A. Steptoe, D. Johnston // *Journal of Psychosomatic Research*. – 1976. – Vol. 20, № 5. – P. 417–424. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3999\(76\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0022-3999(76)90004-0).
6. Lapitan D. G. Measurement of Pulse Wave Velocity Using Cuff Oscillometry and Toe Photoplethysmography / D.G. Lapitan, P.A. Glazkova, A.A. Glazkov, D.A. Rogatkin, Y.A. Kovaleva // *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2023 : proceedings. – IEEE, 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1109/rsemw58451.2023.10202109>.
7. Zhong Q. Carotid-Femoral Pulse Wave Velocity in the Prediction of Cardiovascular Events and Mortality: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis / Q. Zhong, M.-J. Hu, Y.-J. Cui, L. Liang, M.-M. Zhou, Y.-W. Yang, F. Huang // *Angiology*. – 2017. – Vol. 69, № 7. – P. 617–629. – DOI: <https://doi.org/10.1177/0003319717742544>.
8. Roy K. Regional Variation in Pulse Transit Time in the Upper Limb Arteries During Hypotensive and Non-hypotensive Lower Body Negative Pressure / K. Roy, D.S. Chandran, K.K. Deepak // *Cureus*. – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.82752>.
9. Chen Y.-S. Determinants of hand pulse wave velocity and hand pulse transit time in healthy adults / Y.-S. Chen, W.-A. Lu, L.-Y. Hsu, C.-D. Kuo // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14, № 1. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60927-5>.
10. Rasool A. Continuous and Noninvasive Blood Pressure Estimation by Two-Sensor Measurement of Pulse Transit Time / A. Rasool, M. Rafiq, A. Nasir, F.M. Kashif // 14th International Conference on Emerging Technologies (ICET), 2018 : proceedings. – IEEE, 2018. – DOI: <https://doi.org/10.1109/icet.2018.8603612>.
11. Kumar A. Optimized deep neural network models for blood pressure classification using Fourier analysis-based time-frequency spectrogram of photoplethysmography signal / A. Kumar, M. Kumar, R. Komaragiri // *Biomedical Engineering Letters*. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13534-023-00296-6>.
12. Tu D.-K. A Cuffless Blood Pressure Estimation Method Based on PPG Signal [Elektronnyi resurs] / D.-K. Tu. – 2017. – Thesis. – Rezhym dostupu : <http://ndltd.ncl.edu.tw/handle/55516480463839291190>.
13. Azar J. Deep recurrent neural network-based autoencoder for photoplethysmogram artifacts filtering / J. Azar, A. Makhoul, R. Couturier, J. Demerjian // *Computers & Electrical Engineering*. – 2021. – Vol. 92. – Art. 107065. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107065>.
14. Ali M. PPG based Noninvasive Blood Glucose Monitoring using Multi-view Attention and Cascaded BiLSTM Hierarchical Feature Fusion Approach / M. Ali, J. Li, B. Fan, Z. Nie // *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. – 2024. – P. 1–12. – DOI: <https://doi.org/10.1109/jbhi.2024.3464098>.
15. Gao H. A LSTM-Based Realtime Signal Quality Assessment for Photoplethysmogram and Remote Photoplethysmogram / H. Gao, X. Wu, C. Shi, Q. Gao, J. Geng // *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2021 : proceedings. – IEEE, 2021. – DOI: <https://doi.org/10.1109/cvprw53098.2021.00424>.
16. Viunytyskiy O. Continuous cuffless blood pressure measurement using feed-forward neural network / O. Viunytyskiy, V. Lukin, A. Totsky, V. Shulgin, N. Kozhemiakina // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2023. – № 2. – P. 36–53. – DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.2.04>.
17. Guo R. A General Applicable Sphygmogram Discriminator for Detecting Arrhythmia & Motion Artifact / R. Guo, L. Pi, J. Ma, J. Huang, M. Dong // *International Journal of Signal Processing Systems*. – 2016. – Vol. 4, № 5. – P. 427–431. – DOI: <https://doi.org/10.18178/ijsp.4.5.427-431>.
18. Totsky A.V. *Bispectral Methods of Signal Processing: Applications in Radar, Telecommunications and Digital Image Restoration* / A.V. Totsky, A.A. Zelensky, V.F. Kravchenko. – Berlin : de Gruyter GmbH, Walter, 2014. – ISBN 978-3-11-037456-8.
19. Taranchuk A. Quartz Pulse Wave Sensor With a Capacitive Control for Healthcare Solutions / A. Taranchuk, S. Pidchenko // *IEEE Sensors Journal*. – 2021. – Vol. 21, № 6. – P. 8613–8620. – DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3049065>.