

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-97>

УДК 612.1:519.6:004.42:004.51

ХВОСТИВСЬКИЙ МИКОЛА

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0002-2405-4930>

e-mail: hvostivskyi@tntu.edu.ua

ХВОСТИВСЬКА ЛІЛІЯ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0002-4997-8339>

e-mail: hvostivska@tntu.edu.ua

УНІЯТ СЕРГІЙ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0009-0005-3165-9937>

e-mail: uniatsergiy@gmail.com

КУБАШОК ОЛЬГА

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0003-4717-5660>

e-mail: oliafuch@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ, АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВЕЙВЛЕТ-ОБРОБКИ ПУЛЬСОВИХ СИГНАЛІВ В БАЗИСІ МОРЛЕ

В роботі розроблено метод (математичне забезпечення) на базі вейвлет-перетворення в базисі Морле та алгоритмічно-програмне забезпечення задля комп'ютерної обробки пульсових сигналів з метою виявлення флуктуаційно-часових структурних змін на різних масштабах спостереження. Таке дослідження забезпечило обчислення нових діагностичних ознак щодо стану судин людини у вигляді 2D та 3D спектральних зображень вейвлет-коефіцієнтів, чим підвищено рівень діагностичних можливостей комп'ютерних фотоплетизмографів.

Під час створення спеціалізованого програмного забезпечення застосовано інструменти середовища Matlab, а для реалізації автоматизованої обробки у складі комп'ютерних фотоплетизмографічних систем було використано модуль Matlab Guide.

Досліджено ефективність роботи розроблено програмного забезпечення для обробки пульсового сигналу з метою виявлення своєчасних змін у стані судинної системи. Результати показали, що розроблене програмне забезпечення функціонує коректно та достовірно відображає судинні зміни, що підтверджується у вигляді 3D і усереднених 2D спектральних представлень вейвлет-коефіцієнтів, які виступають новими діагностичними індикаторами.

Ключові слова: пульсовий сигнал судин людини, вейвлет-обробка, вейвлет Морле, математичне забезпечення, алгоритмічне забезпечення, програмне забезпечення, Matlab.

KHVOSTIVSKYI MYKOLA

KHVOSTIVSKA LILIA

UNIAT SERHII

KUBASHOK OLHA

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

MATHEMATICAL, ALGORITHMIC AND SOFTWARE SUPPORT FOR WAVELET PROCESSING OF PULSE SIGNALS IN THE MORLET BASIS

The work developed a method (mathematical support) based on the wavelet transform in the Morlet basis and algorithmic software for computer processing of pulse signals in order to detect fluctuation-temporal structural changes at different observation scales. It was found that the use of wavelet transform provides a highly accurate analysis of the time-frequency organization of the pulse signal, allowing to detect its structural fluctuations on different time scales - this is of significant importance for the diagnosis of functional changes in the human vascular system. The research conducted in the work provided the calculation of new diagnostic features regarding the state of human vessels in the form of 2D and 3D spectral images of wavelet coefficients, which increased the level of diagnostic capabilities of computer photoplethysmographs.

To register pulse signal data as objects of wavelet processing, a computer photoplethysmograph developed on the basis of the Department of Biotechnical Means of TNTU was used. As a sensor for registering the pulse signal, an optical sensor was used, which includes an infrared LED with a radiation range of 625–740 nm, which acts as a light source, and a phototransistor that records the signal reflected from the vascular surface. Tools from the Matlab environment were utilized to develop the software for pulse signal processing, with the Matlab Guide module employed to implement automated processing within computer-based photoplethysmographic systems.

The efficiency of the developed software for processing the pulse signal was studied in order to detect timely changes in the state of the vascular system. The results showed that the developed software functions correctly and reliably reflects vascular changes, which is confirmed in the form of 3D and averaged 2D spectral images of wavelet coefficients, which act as new diagnostic indicators.

Keywords: pulse signal of human vessels, wavelet processing, Morlet wavelet, mathematical support, algorithmic support, software, Matlab.

Стаття надійшла до редакції / Received 19.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Постановки проблеми. Аналіз досліджень та публікацій

Згідно з даними ВООЗ (2024 р.), приблизно 30% усіх випадків смертності спричинені захворюваннями серцево-судинної системи. Зокрема, серцеві патології становлять 12,2%, а судинні — 9,7%

від загальної кількості. Високий рівень поширення цих захворювань, який дедалі частіше спостерігається серед молодого населення, вимагає від сучасної кардіології активного впровадження новітніх підходів для своєчасної діагностики та попередження розвитку таких патологій.

У сучасній кардіології для дослідження стану судинної системи та визначення її параметрів широко застосовується неінвазивна методика фотоплетизмографії. Комп'ютерні фотоплетизмографи, що функціонують на основі цього методу, дозволяють отримувати діагностичні дані (інформацію), які відображають функціональний стан судин людини. Ефективність та інформативність таких систем — зокрема, обсяг отриманої діагностичної інформації — значною мірою залежать від якості реалізованого алгоритмічно-програмного забезпечення для обробки пульсового сигналу, яке ґрунтується на відповідних методах обробки.

Серед широкого спектру відомих методів до обробки пульсового сигналу виокремлюють кількісні методи [1, 2], статистичні [3], спектральні [4-6], методи вейвлет-обробки в базисі Добеші [7, 8] і синфазну/компонентну обробки [8]. Проте зазначені методи у порівнянні з вейвлет-обробкою, не дають змоги повноцінно вивчати структурні флуктуації пульсового сигналу в часовому вимірі на різних масштабах, що є критично важливим для раннього виявлення судинних патологій. При цьому слід відзначити, що у наявних дослідженнях потенціал вейвлет-перетворення реалізовано лише частково — переважно з використанням базису Добеші, без залучення інших, більш відповідних форм пульсового сигналу, зокрема Морле.

Формулювання цілей статті

Метою даного дослідження є впровадження нових функцій базису у процес вейвлет-обробки пульсового сигналу, що створює підґрунтя для розробки ефективного алгоритмічно-програмного забезпечення комп'ютерних фотоплетизмографів. Це, у свою чергу, дозволить отримувати нову діагностичну інформацію щодо стану судинної системи людини, підвищуючи загальний рівень діагностичної ефективності приладів, що становить актуальну наукову проблему сучасної кардіології.

Реєстрація пульсового сигналу

При реєстрації ПС використано розроблений комп'ютерний фотоплетизмограф на базі кафедри біотехнічних систем в ТНТУ (автори розробки - Хвостівська Л.В. та Хвостівський М.О.) (рис.1).

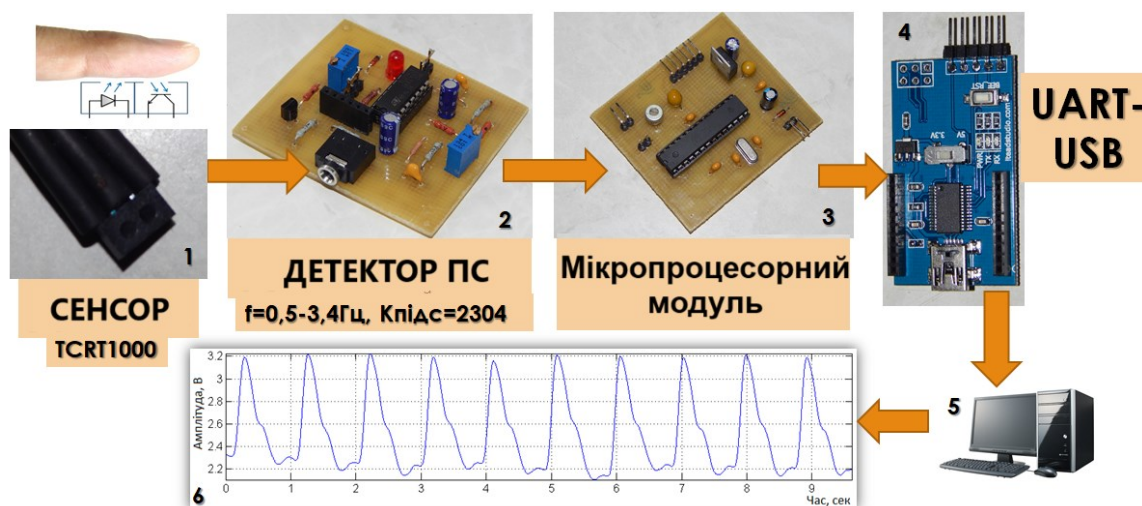


Рис. 1. Узагальнена структура комп'ютерного фотоплетизмографа [10]

Оптичний сенсор 1, який функціонує як елемент реєстрації ПС, складається з інфрачервоного світлодіода, що виконує роль джерела світла, та фототранзистора, який фіксує ІЧ-випромінювання, відбите від поверхні кровоносних судин. Детектор 2 виконує функції підсилення низького за рівнем ПС до прийнятного рівня амплітуди, необхідного для надійного зчитування, та забезпечує узгодження сигналу з входом мікропроцесорного модуля 3 за параметрами електричного опору. Мікропроцесорний модуль 3 здійснює АЦП сигналу та його попередню обробку ПС (фільтрація, формування пакету даних необхідного формату для входу перетворювача UART-USB 4). UART-USB 4 забезпечує з'єднання між мікропроцесорним блоком 3 та комп'ютером 6 через USB-інтерфейс. На ПК 6 здійснюється подальша робота з сигналом 6: його збереження, обробка, графічна візуалізація.

На рис. 3 представлено ПС, які зареєстровані за допомогою вище описаного комп'ютерного фотоплетизмографа.

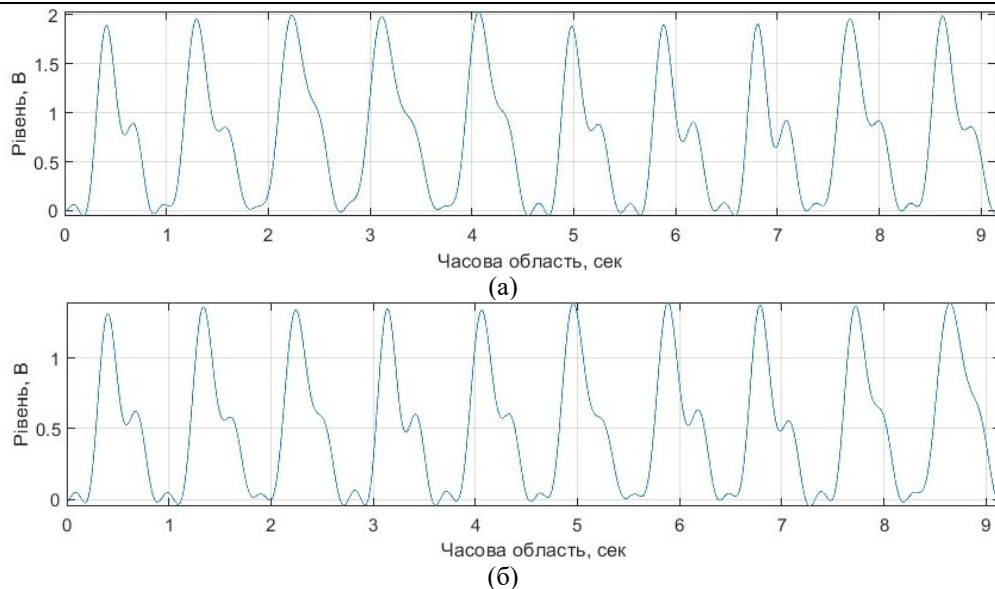


Рис.3. Зарєєстровані реалізації експериментальних даних ПС: а) норма; б) патологія

Метод обробки пульсового сигналу

Ритмічність є характерною ознакою багатьох біологічних і фізичних систем, включаючи ПС. Його часову структуру, закладену в числових даних, можливо виділити та проаналізувати за допомогою спектральних методів, таких як перетворення Фур'є чи вейвлет-перетворення.

Вейвлет-перетворення характеризується високою частотною роздільною здатністю та низькою часовою для сигналів із низькими частотами, а також високою часовою і низькою частотною роздільною здатністю для сигналів із високими частотами. Вейвлет-перетворення адаптує роздільну здатність відповідно до характеру ПС: у часово-залежних ділянках воно забезпечує точну локалізацію у часі, а в частото-залежних – кращу деталізацію у частотній області.

Вейвлет-перетворення дозволяє не лише визначити, які частоти присутні у ПС, а й встановити момент часу їх появи. Це досягається шляхом обробки ПС на різних масштабах згідно з відповідним математичним виразом:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

де $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – базис обробки перетворення; a – масштабний коефіцієнт, b – величина зміщення часового.

Незважаючи на те, що результат вейвлет-обробки фізичного часового ряду ПС теоретично не залежить від конкретного типу вейвлета, для підвищення ефективності аналізу доцільно обирати базисну функцію, форма якої наближено відповідає структурі ПС. Оскільки дані ПС здебільшого представлені як періодичні синусоїдальні імпульси, цілком закономірно, що найчастіше для їх аналізу використовують вейвлет Морле. Цей вейвлет являє собою комплексну синусоїду, обмежену гаусівською обвідною, тобто синусоїдальний сигнал, локалізований за допомогою гаусового вікна:

$$\psi(t, a, b) = e^{i\omega \frac{t-b}{a}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-b}{a}\right)^2}, \quad (2)$$

де ω – частота; a – коефіцієнт масштабування; b – зміщення часове.

Коефіцієнти t , a та b впливають на формування структури вейвлет-функції.

Алгоритмічне забезпечення обробки пульсового сигналу

Алгоритм обробки ПС на основі вейвлет-обробки з базисом Морле (1-2) представлено на рис. 6.

Згідно з реалізованим алгоритмічним забезпеченням, зображеним на рис. 6, обробка ПС включає такі етапи: введення значень масштабних коефіцієнтів $a = 1, a_{\max}$, часових зсувів $b = 1, b_{\max}$ та інтервалу часу у вигляді послідовності $t = 1, t_{\max}$; обчислення базової частоти ω та базисної функції Морле $\psi(t)$; розрахунок вейвлет-коефіцієнтів $C(a, b)$ залежно від заданих параметрів a, b, t із використанням циклічної обробки; подальше перетворення сигналу у частотну область за допомогою функції Фур'є $W(f, a, b)$. Реалізоване алгоритмічне забезпечення оптимізоване для пріоритетної обробки сигналу ПС з використанням вейвлет-обробки, що дає змогу досліджувати часово-частотні флуктуації сигналу у 3D проекції. Це, у свою чергу, забезпечує можливість відстеження усіх варіаційних процесів у структурі судин, вказуючи на мінімальні або максимальні відхилення у їх функціонуванні.

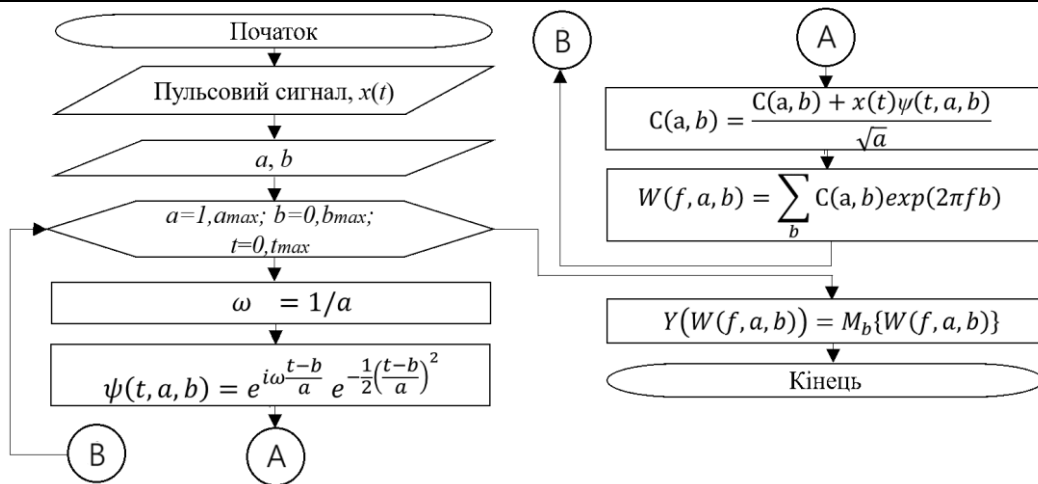


Рис.6. Алгоритмічне забезпечення вейвлет-обробки ПС в базисі Морле

Результати обробки пульсового сигналу та інтерпретація

На рис. 7–8 представлено результат вейвлет-обробки ПС у вигляді 3D зображення, що відображає залежність «спектр/масштаб/час».

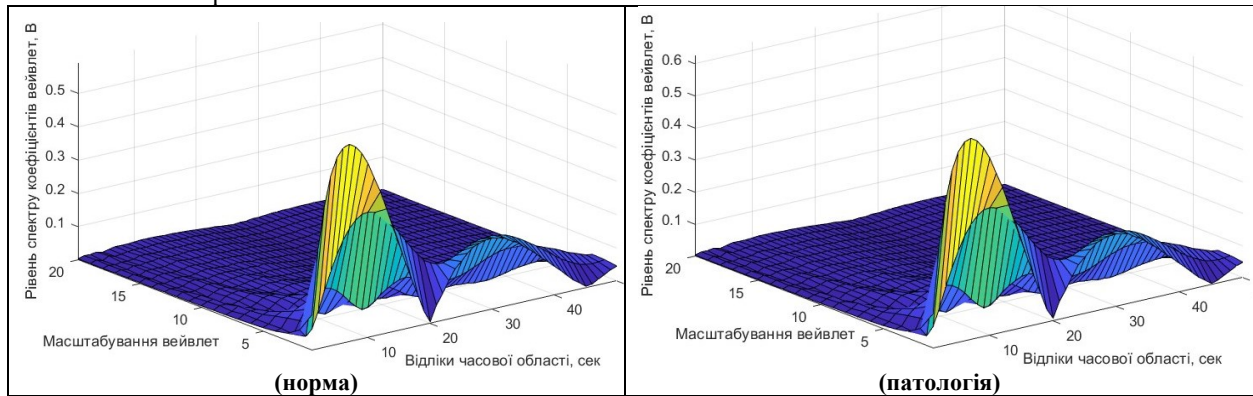


Рис.7. 3D зображення коефіцієнтів вейвлет ПС

Для більш детального аналізу значень вейвлет-спектрів ПС (рис.6-7) застосовано критерій, що передбачає їх усереднення з урахуванням часових зсувів згідно з таким виразом:

$$\hat{Y}(a, b) = M_b\{W(a, b)\}, \quad (3)$$

На рис.9 відображено результат усереднення 3D коефіцієнтів вейвлет.

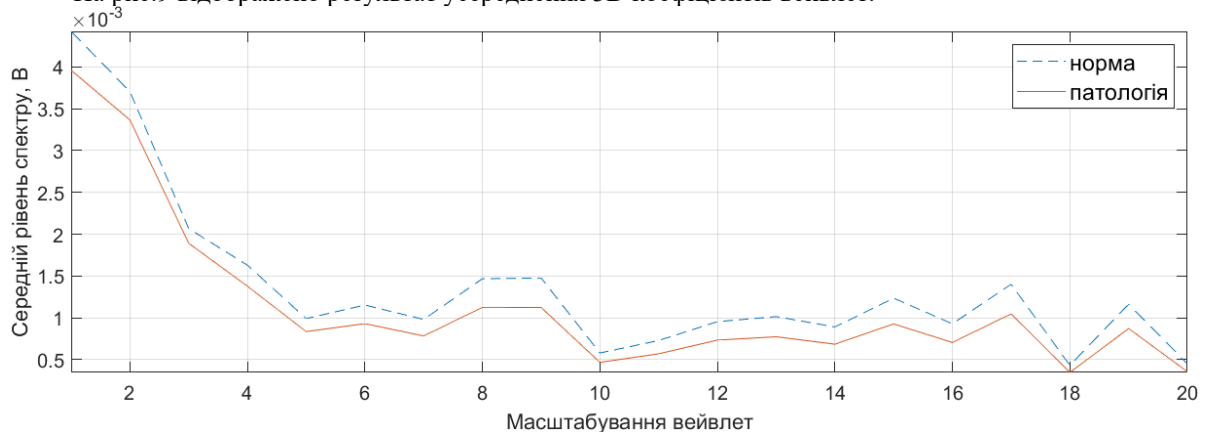


Рис.9. Усередненні 3D коефіцієнти вейвлет

Як видно з рис. 9, діагностичні параметри, представлені у вигляді сукупності вейвлет-коефіцієнтів, є інваріантними — вони локалізуються на одних і тих самих масштабах для різних станів судин. При цьому спектральні рівні для патологічного стану (підвищена жорсткість судин) є зниженими порівняно з нормою, що однозначно свідчить про наявність судинної патології. Загалом обидва стани характеризуються схожою структурою спектра, але різним рівнем вейвлет-коефіцієнтів ПС.

Для автоматизації вейвлет-обробки ПС було використано модуль GUIDE середовища MATLAB, який забезпечує створення графічного інтерфейсу користувача та відповідного програмного забезпечення, що виконується автоматично при взаємодії з елементами керування.

Розроблене ПЗ з інтерфейс користувача наведено на рис. 10.

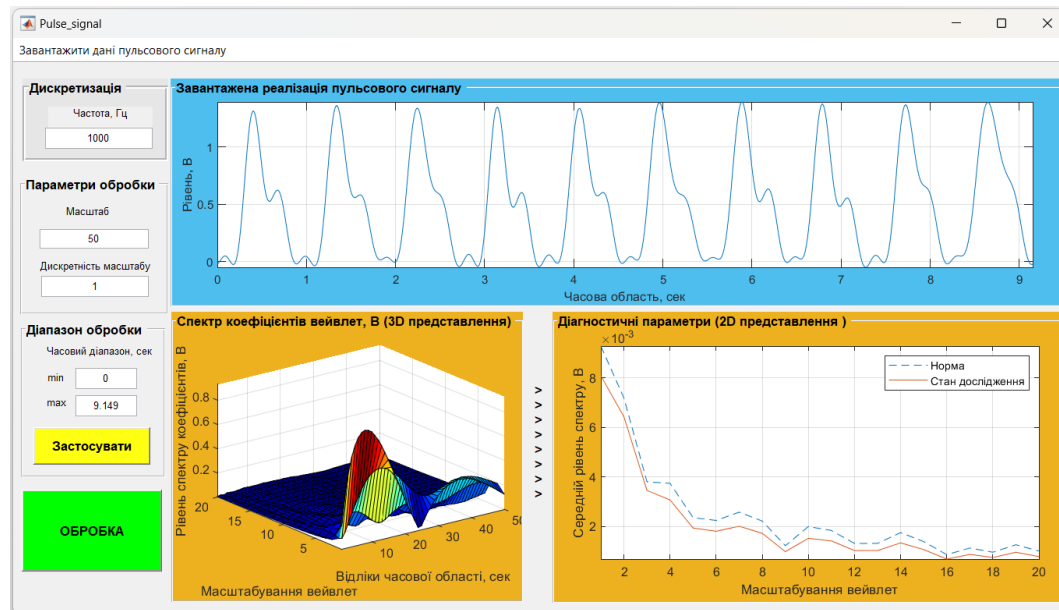


Рис.10. Результат роботи розробленого ПЗ для обробки ПС

Розроблене ПЗ (рис.10) уможливорює автоматизацію процесу аналізу стану судин, полегшуючи роботу користувача (лікаря). Отримані результати наочно демонструють відмінності між різними станами, зокрема між нормою та патологією. Незважаючи на структурну подібність (інваріантність) сигналів у обох випадках, спостерігається відмінність у спектральних характеристиках. Ці зміни свідчать про наявність патологічних процесів у судинній системі.

Висновки

Метод вейвлет-обробки ПС з базисом Морле забезпечує аналіз структурних флуктуацій сигналу в часовому вимірі на різних масштабах спостереження, що дає змогу отримати нову діагностично значущу інформацію щодо стану судин людини.

Розроблене алгоритмічне та ПЗ, яке побудовано на основі вейвлет методу, дає змогу формувати спектральне представлення 3D та 2D вейвлет-коефіцієнтів, що підвищує діагностичні можливості комп'ютерних фотоплетизмографів (додано одну нову діагностичну ознаку).

Проведені дослідження підтвердили коректну роботу розробленого ПЗ, яке ефективно виявляє зміни стану судин у 3D- та 2D-візуалізаціях спектрального розподілу вейвлет-коефіцієнтів. Запропоновані нові спектральні параметри вейвлет коефіцієнтів є потенційно інформативними для ідентифікації судинних патологій.

Література

1. Павлов С.В., Махотнюк М.В. (2002) Оптикоелектронні методи діагностики стану серцево-судинної системи. Тези доповідей МНТК «Photonics-ODS 2002» (С.65). Видавництво УНІВЕРСУМ-Вінниця.
2. Sorelli, M.; Perrella, A.; Bocchi, L. (2018) Detecting Vascular Age Using the Analysis of Peripheral Pulse. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 65, 2742–2750. DOI: 10.1109/TBME.2018.2814630.
3. Марченко Б. Млинко Б., Фриз М. (2005) Математична модель фотоплетизмосигналу – основа ідентифікації інформативних ознак. *Міжнародний науковий журнал «Комп'ютинг»*, 5(2), 73-82.
4. Данилевська В.Г., Луцук О.В., Рибін О.І., Шарпан О.Б. (2006) Особливості і можливості діагностики за нормалізованим перетворенням Фур'є пульсового сигналу. *Електроніка та зв'язок*, 2, 49-54.
5. Зудов О. М., Шарпан О.Б. (2001) Діагностичні можливості спектрального аналізу сигналів пульсової хвилі. *Вісник ЖІТІ. Технічні науки*, 16, 82-85.
6. Шарпан О.Б. (2004). Дослідження залежності амплітудного спектра пульсового сигналу від стану системи гемодинаміки. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, 1, 110-117.
7. Гніліцький В.В., Мужичька Н.В. (2011) Задача вибору материнського вейвлету для обробки пульсової хвилі в умовах завад. *Вісник ЖДТУ*, 2, 64-69.

8. El-Sharo, Sameh, Al-Ghraibah, Amani, Al-Nabulsi, Jamal, Matalgah, Mustafa. (2022). Evaluation of the carotid artery using wavelet-based analysis of the pulse wave signal. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 12. 1456. DOI: 10.11591/ijece.v12i2.pp1456-1467.

9. Хвостівська Л.В. (2021). *Математична модель та методи аналізу пульсового сигналу для підвищення інформативності фотоплетизмографічних систем* [Дис. канд. тех. наук, ТНТУ]. Інституційний репозитарій ТНТУ. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/34613>.

10. Хвостівська Л.В., Хвостівський М.О. (2015). Синтез структури інформаційної системи реєстрації та обробки пульсового сигналу. *Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка*. 4, (1), 83-89. ISSN 2227-8842.

References

1. Pavlov S.V., Makhotniuk M.V. (2002) Optoelektronni metody diahnostryky stanu sertsevo-sudynnoi systemy. Tezy dopovidei MNTK «Photonics-ODS 2002» (S.65). Vydavnytstvo UNIVERSUM-Vinnytsia.

2. Sorelli, M.; Perrella, A.; Bocchi, L. Detecting Vascular Age Using the Analysis of Peripheral Pulse. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2018, 65, 2742–2750. DOI: 10.1109/TBME.2018.2814630.

3. Marchenko B. Mlynko B., Fryz M. (2005) Matematychna model fotopletyzmosyhnalu – osnova identyfikatsii informatyvnykh oznak. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Kompiutynh»*, 5(2), 73-82.

4. Danylevska V.H., Lutsuk O.V., Rybin O.I., Sharpan O.B. (2006) Osoblyvosti i mozhlyvosti diahnostryky za normalizovanyim peretvorenniam Furie pulsovoho syhnalu. *Elektronika ta zviazok*, 2, 49-54.

5. Zudov O. M., Sharpan O.B. (2001) Diahnostychni mozhlyvosti spektralnogo analizu syhnaliv pulsovoi khvyli. *Visnyk ZhITI. Tekhnichni nauky*, 16, 82-85.

6. Sharpan O.B. (2004). Doslidzhennia zalezhnosti amplitudnogo spektra pulsovoho syhnalu vid stanu systemy hemodynamiky. *Naukovi visti NTUU “KPI”*, 1, 110-117.

7. Hnilitskyi V.V., Muzhytska N.V. (2011) Zadacha vyboru materynskoho veivletu dlia obrobky pulsovoi khvyli v umovakh zavad. *Visnyk ZhDTU*, 2, 64-69.

8. El-Sharo, Sameh, Al-Ghraibah, Amani, Al-Nabulsi, Jamal, Matalgah, Mustafa. (2022). Evaluation of the carotid artery using wavelet-based analysis of the pulse wave signal. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 12. 1456. DOI: 10.11591/ijece.v12i2.pp1456-1467.

9. Khvostivska L.V. (2021). *Matematychna model ta metody analizu pulsovoho syhnalu dlia pidvyshchennia informatyvnosti fotopletyzmohrafichnykh system* [Dys. kand. tekhn. nauk, TNTU]. Instytutsiinyi repozytarii TNTU. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/34613>.

10. Khvostivska L.V., Khvostivskyi M.O. (2015). Syntez struktury informatsiinoi systemy reiestratsii ta obrobky pulsovoho syhnalu. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu: zbirnyk nauk. prats. Fyzyka. Elektronika*. 4, (1), 83-89. ISSN 2227-8842.