

# Декомпозиція сигналу пульсової хвилі

В.М. Лаврентьєв

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, 03187, м. Київ,  
проспект Академіка Глушкова, 40, [vaslavr@i.ua](mailto:vaslavr@i.ua)

*V.M. Lavrentyev*

## **DECOMPOSITION OF THE PULSE WAVE SIGNAL**

**Abstract.** In recent years there has been an increase of interest in the technique of photoplethysmography and driven by the demand for low cost, simple and portable technology on the one hand and on the other hand the photoplethysmogram, which is measured noninvasively, can provide valuable information about cardiovascular system performance. That technology has been used for measuring blood oxygen saturation, blood pressure and cardiac output, assessing autonomic function and detecting peripheral vascular disease. This is despite the fact that the characteristics of the pulse waveform not being fully understood. The pulse wave decomposition algorithm that allows representing wave as the sum of several components: direct pulse and reflected proposes in this paper. As an illustration, the results of the algorithm on the examples of pulse wave's decomposition of real patients are presented. Results of decomposition of pulse waves of different type are shown. Each pulse wave is decomposed into a direct pulse and several reflected pulses, and uniquely. The obtained values of maximum amplitudes and moments of time of maxima can be data for further analysis. It is essential that the decomposition process takes place regardless of the shape of the curve, that is, whether there are additional extremes on the descending part of the curve or are they absent. In order to create a database that based on the decomposition results, it is proposed to identify individual types of pulse waves and then relate them to medical and physiological parameters. The database is on the one hand different forms of pulse waves and on the other the parameters of the cardiovascular systems, both healthy and affected by various diseases, and they are linked by both hard and soft connections.

**Key words:** cardiovascular system, pulse wave, decomposition of the signal.

**Анотація.** Останніми роками спостерігається зростання інтересу до техніки фотоплетизмографії, яка може дати цінну інформацію про роботу серцево-судинної системи людини і, що важливо, проводиться неінвазивно. Ця технологія застосовується для вимірювання насичення крові киснем, артеріального тиску та серцевого викиду, оцінки вегетативної функції, а також виявлення захворювань периферичних судин. Але незважаючи на все ширше використання пульсової хвилі для виявлення можливих хвороб у серцево-судинній системі її характеристики не повністю зрозумілі. В статті пропонується алгоритм декомпозиції пульсової хвилі, який дозволяє представити її як суму декількох компонентів: прямого імпульсу та від-

битих. Як ілюстрація наведено результати роботи алгоритму на прикладах декомпозиції пульсових хвиль реальних пацієнтів. Пропонується за результатами декомпозиції визначити окремі типи пульсових хвиль і пов'язати їх з медичними та фізіологічними параметрами з метою створення бази даних, де форма пульсової хвилі пов'язується з параметрами як здорової серцево-судинної системи, так і враженої різними захворюваннями.

**Ключові слова:** серцево-судинна система, пульсова хвиля, декомпозиція сигналу.

**Анотація.** Предлагается алгоритм декомпозиции пульсовой волны, позволяющий представить ее как сумму нескольких компонентов прямого сигнала и отраженных. По результатам декомпозиции предлагается определять отдельные типы пульсовых волн и связать их с медицинскими и физиологическими параметрами с целью создания базы данных, где форма пульсовой волны связуется с параметрами как здоровой сердечно-сосудистой системы, так и пораженной различными заболеваниями.

**Ключевые слова:** сердечно-сосудистая система, пульсовая волна, декомпозиция сигнала.

Останніми роками спостерігається зростання інтересу до техніки фотоплетизмографії, зумовлене попитом на низьку вартість, просту та портативну технологію з однієї сторони, а з іншої – фотоплетизмограма, яка вимірюється неінвазивно, може дати цінну інформацію про роботу серцево-судинної системи. Ця технологія застосовується для вимірювання насичення крові киснем, артеріального тиску та серцевого викиду, оцінки вегетативної функції, а також виявлення захворювань периферичних судин [1]. Наприклад, швидкість пульсової хвилі визнана як маркер для виявлення можливих катастроф у серцево-судинній системі. Внаслідок цього контроль швидкості занесений у регламент Європейської ліги з артеріальної гіпертензії 2007 року [2].

Це відбувається незважаючи на те, що форма та характеристики пульсової хвилі не повністю зрозумілі.

В даний час у сфері використання і аналізу пульсової хвилі спостерігаються два напрямки. Перший, суто фізіологічний, коли у формі кривої пульсової хвилі визначають параметри, які відповідають або можуть відповідати відомим пара-

метрам функціонування серцево-судинної системи з точки зору медицини. Наприклад у статті [1] показано, які параметри пульсової хвилі вимірюються, та які на основі вимірювань потім обчислюються, а також наводиться їх інтерпретація (рис. 1). Розрізняють три хвилі, які відповідають наступному: перша – викид крові з лівого шлуночка, друга з'являється, коли хвиля попадає у стінку артерії і відбивається, і третя – дикротична, яка генерується коли аортальний клапан закритий. Для аналізу вимірюються максимальні або мінімальні амплітуди хвиль та моменти їх досягнення, на основі яких обчислюються такі параметри як нахил  $h1/t1$ , що вказує на виконання серцем функції викиду крові та параметр  $h3/h1$ , пов'язаний з еластичністю артеріальної системи. Використовують також мінімуми на схилі пульсової хвилі, наприклад, параметр  $h4$  пов'язують з периферичним опором системи, а  $h4/h1$  його відхилення. Але якщо проаналізувати цей приклад, то по-перше, відбитих хвиль має бути не одна, а по-друге, максимуми сумарної хвилі декількох компонентів не завжди співпадають з максимумами самих компонентів, що може привести до недостовірних даних аналізу.

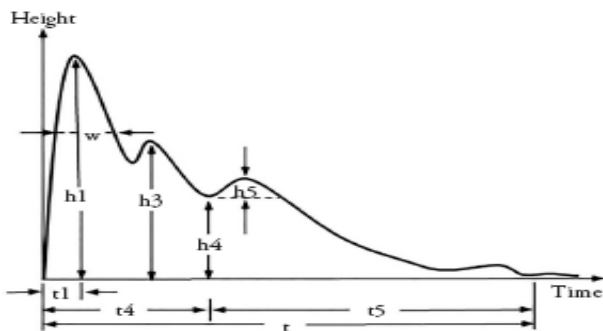


РИС. 1. Прототип пульсової хвилі здорової людини [1]

Можливо навести також інші приклади аналізу пульсових хвиль з більшою або меншою кількістю використаних параметрів, але базова ідея, що пульсова хвиля переважно розглядається як сума прямої пульсової хвилі і відбитої лишається незмінною.

На рис. 2 показані чотири типи форми пульсової хвилі, які зустрічаються на практиці [3]. В статті дається загальна інтерпретація форм, причому наводиться змінність форми кривої залежна від вікових змін. Навіть у пульсовій хвилі 4-го типу, де відбита хвиля практично

зливається з прямою, це пояснюється значною жорсткістю стінок аорти, що також можливо віднести до вікових змін серцево-судинної системи.

Але очевидно, що виділити і отримати параметри відбитої хвилі принаймні в хвилях двох останніх типів немає можливості, що унеможлиблює проведення прийняттого аналізу пульсової хвилі.

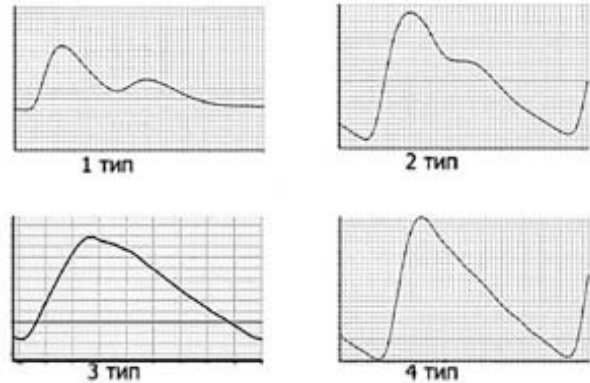


РИС. 2. Типи пульсових хвиль [3]

Другий, суто математичний напрямок, коли форму кривої пульсової хвилі розглядають з точки зору математичної обробки сигналів. Для прикладу можна вказати використання декомпозиції Гільберта – Хуанга [4, 5], методу фазової площини [6], методів нелінійного аналізу часових рядів та детермінований нелінійний прогноз [7], математичного моделювання процесів проходження гемодинамічним імпульсом вздовж судин крові [8] та інші. В останній статті показано, від чого в ідеалі залежить відбивна хвиля для різних так званих точок біфуркації, що необхідно врахувати при аналізі реальних процесів.

Тому необхідно мати алгоритм обробки сигналів пульсових хвиль, який дозволяє мати результат незалежно від форми кривої.

Такий алгоритм пропонується далі. По-перше, послідовність сигналу пульсової хвилі, яка отримана в результаті вимірювання, обробляється за допомогою модифікації перетворення Гільберта – Хуанга. В результаті чого послідовність фільтрується від високочастотного шуму, якщо такий є, а також від низькочастотних складових, які обумовлені наявністю нестационарних коливань у самій судинній системі і присутністю в організмі інших фізіологічних процесів – дихання, скорочення м'язів і т. п. В основі алгоритму декомпозиції є припущення, що відбитих хвиль може бути більше ніж

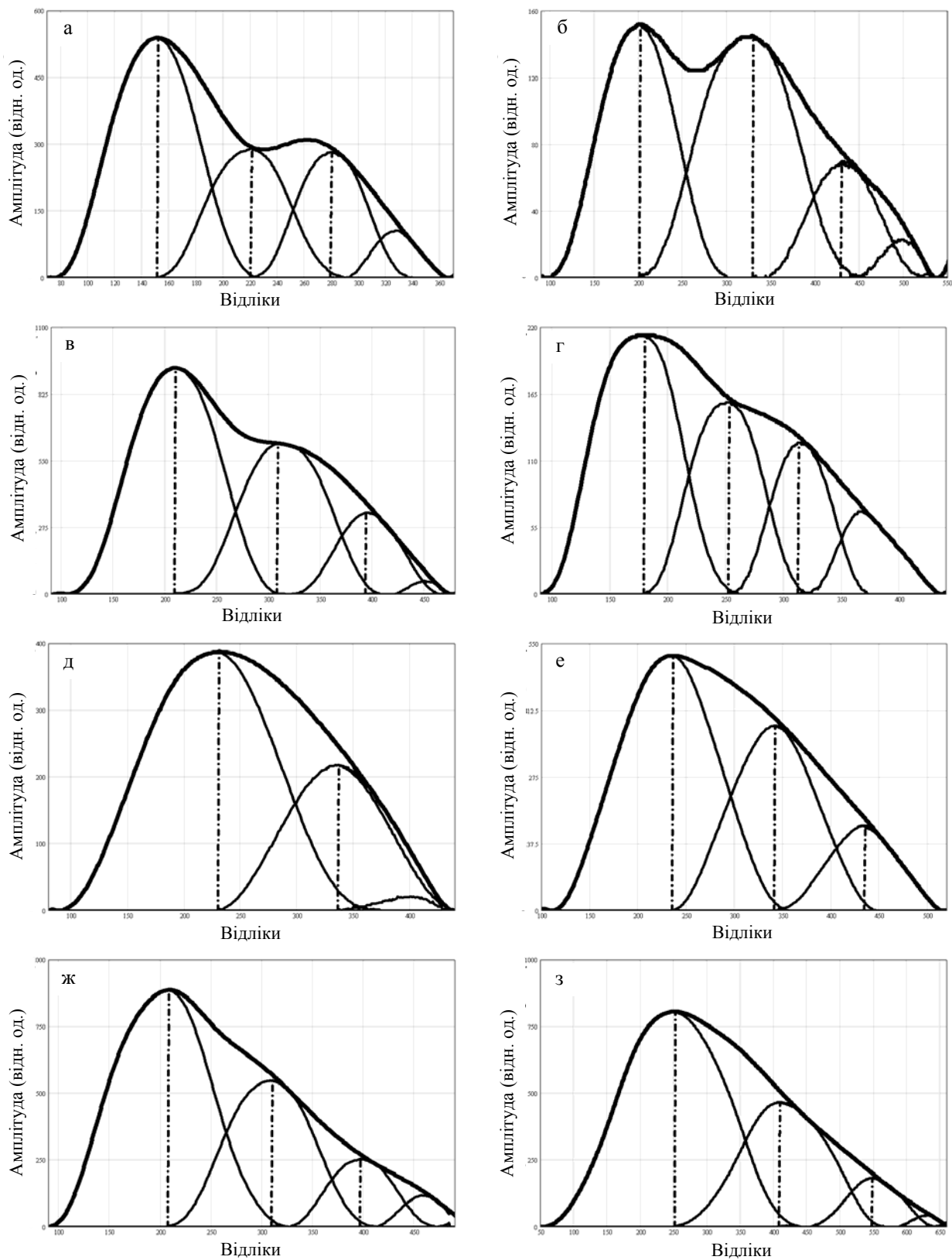


РИС. 3. Декомпозиція різних форм пульсових хвиль

одна. Тому далі будемо розглядати пульсову хвилю як суму прямого імпульсу та одного чи більше відбитих імпульсів.

Алгоритм декомпозиції розглядається на прикладі однієї пульсової хвилі  $P$ .

Спочатку знаходяться моменти початку пульсової хвилі  $t_0$  і кінця  $t_{max}$ .

Далі визначається, максимальна амплітуда  $A1$  і момент  $t1$  цього максимуму. На основі цих даних визначається форма сигналу прямого імпульсу  $P1$ .

Від сигналу пульсової хвилі  $P$  віднімається сигнал  $P1$  прямого імпульсу. Далі визначається максимальна амплітуда  $A2$  отриманої різниці  $R1$  і момент часу  $t2$  цього максимуму. Якщо вважати, що моментом початку сигналу різниці  $R1$  є момент  $t1$ , ми маємо дані для визначення форми сигналу першого відбитого імпульсу  $P2$ .

Далі від різниці  $R1$  віднімається сигнал першого відбитого імпульсу  $P2$  і отримується різниця  $R2$ , сигнал якої зростає від нульового значення в момент часу  $t2$  до максимуму  $A3$  в момент  $t3$ . Таким чином, ми отримуємо дані для визначення форми сигналу другого відбитого імпульсу  $P3$ .

Аналогічним чином процес повторюється до отримання різниці близької до нуля або до кінця пульсової хвилі – моменту часу  $t_{max}$ .

На рис. 3 показані результати декомпозиції пульсових хвиль різного типу. Неважко побачити, що кожна пульсова хвиля розкладається на прямий імпульс та декілька відбитих імпульсів, причому однозначно. Отримані значення максимальних амплітуд і моментів часу максимумів можуть бути даними для аналізу.

На рис. 4 показані результати декомпозиції двадцяти пульсових хвиль двох типів: з явним максимумом на спаді пульсової хвилі і без такого. Кожна точка відповідає відносній амплітуді ( $A_i/A1$ ) та відносному часу  $(t_i - t1)/(t_{max} - t1)$  перших та других відбитих імпульсів.

Виділені області 1 і 2 відповідають першому і другому відбитому імпульсу пульсових хвиль типу є, ж, з на рис. 3, а області 3 і 4 відповідають першому і другому відбитому імпульсу пульсових хвиль типу а, б, в на рис. 3. Це дає підстави вважати, що за результатами декомпозиції можливо визначити окремі типи пульсових хвиль і пов'язати їх з медичними та фізіологічними параметрами. Мова йде про можливість створення бази даних, де форма пульсової хвилі пов'язується з параметрами як здо-

рової серцево-судинної системи, так і враженої різними захворюваннями.

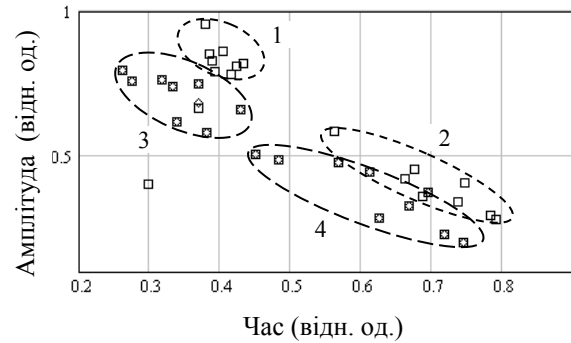


РИС. 4. Відносні амплітуди перших та других відбитих імпульсів різних пульсових хвиль

Створення такої бази даних пропонується в [9]. Основою такої бази є набір еталонних форм, які відповідають тому чи іншому стану серцево-судинної системи. Аналіз пульсової хвилі спочатку зводиться до порівняння з еталонними і визначенням умовної групи, до якої її можливо віднести. Але такий аналіз не завжди може дати достовірний результат.

На рис. 5 показані приклади пульсових хвиль для пацієнтів з різними захворюваннями: розширена кардіоміопатія, шлуночкова аневризми, старий інфаркт міокарда та дегенеративна хвороба клапанів та типова форма хвилі старого інфаркту міокарда.

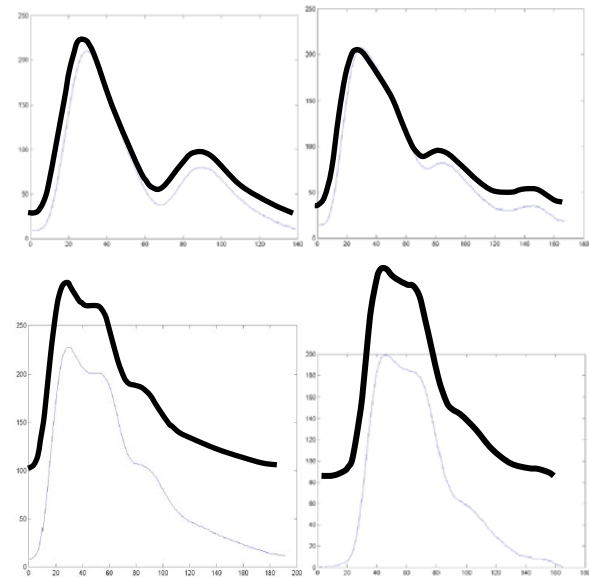


РИС. 5. Пульсові хвилі у пацієнтів з різними захворюваннями [9]

Якщо дві верхні пульсові хвилі ще можливо відрізнити одну від одної і визначити найбільш схожий еталон, то з двома нижніми можуть виникнути суперечливі рішення.

В тій же статті [9] пропонується створення моніторингової системи, тобто бази даних для кожного окремого пацієнта та відслідковувати зміну параметрів вимірювань пульсової хвилі протягом певного часу, тому що тривале відслідковування може дати більше інформації ніж окреме вимірювання, не пов'язане з попередніми. Тобто лінії трендів параметрів стану серцево-судинної системи є набагато більш цінними.

В нашому випадку це ще більш показово тому, що в результаті декомпозиції отримуємо точні параметри відбитих імпульсів і таким чином порівняння вимірювань буде більш інформативним.

Автор висловлює подяку Чайковському І.А. за допомогу і консультації та надані сигнали пульсових хвиль, які були виміряні інформаційно-вимірювальним комплексом пульсової діагностики [10].

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Chuan-Yi Liu, Ching-Chuan Wei, Pei-Chen Lo. Variation Analysis of Sphygmogram to Assess Cardiovascular System under Meditation. *Evid Based Complement Alternat Med.* 2009 Mar; 6(1): 107–112.
- Guidelines for the management of arterial hypertension. The task force for the ESH, ESC. *J. Hypertension.* 2007. Vol. 25. P. 1105–87.
- Кокодий Н.Г., Шапошникова А.В., Кайдаш М.В., Тиманюк В.А. Математический анализ сфигмограммы. *Physics and engineering in photobiology and photomedicine.* 2017. N 1, 2. P. 87–94.
- Hemant Sharma Heart rate extraction from PPG signals using variational mode decomposition. *Biocybernetics and Biomedical Engineering.* 2019. Vol. 39, Issue 1, January–March. P. 75–86.
- Опмоков В.Д., Бороноев В.В. Комплементарная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом ceemdan как метод решения основных проблем применения преобразования Гильберта-Хуанга. *Журнал радиоэлектроники.* 2016. № 9. С. 1–7.
- Нікітчук Т.М., Поліщук Ю.А. Використання методу фазової площини для дослідження пульсової хвилі. *Вісник ЖДТУ. Технічні науки.* 2011. № 2 (57). С. 80–87.
- Sviridova N., Sakai K. Human photoplethysmogram: new insight into chaotic characteristics. *Chaos, Solitons and Fractals* 77. 2015. P. 53–63.
- Tygliyan M.A., Tyurina N.N. Matematicheskaya model' prokhozheniya gemodinamicheskogo impul'sa cherez tochki bifurkatsii. Preprint IPM im. M.V. Keldysha. 2017. № 62. 18 s. doi:10.20948/prepr-2017-62.
- Zhaopeng Fan, Gong Zhang, Simon Liao. Clinical analysis for cardiovascular disease by calculating stiffness index, cardiac output from pulse wave. In *Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE'09. Canadian Conference on.* P. 478–481.
- Десяряк В.І. Пульсові процеси в серцево-судинній системі людини та їх використання для діагностики. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи.* 2014. № 13. С. 43–52.

#### REFERENCES

- Chuan-Yi Liu, Ching-Chuan Wei, Pei-Chen Lo. Variation Analysis of Sphygmogram to Assess Cardiovascular System under Meditation. *Evid Based Complement Alternat Med.* 2009 Mar; 6(1): 107–112.
- Guidelines for the management of arterial hypertension. The task force for the ESH, ESC. *J. Hypertension.* 2007. Vol. 25. P. 1105–87.
- Kokodiy N.G., Shaposhnikova A.V., Kaydash M.V., Timanyuk V.A. Matematicheskiy analiz sfigmogrammy. *Physics and engineering in photobiology and photomedicine.* 2017. N 1, 2. P. 87–94.
- Hemant Sharma Heart rate extraction from PPG signals using variational mode decomposition. *Biocybernetics and Biomedical Engineering.* Vol. 39, Issue 1, January–March 2019. P. 75–86.
- Ompokov V.D., Boronoyev V.V. Komplementarnaya mnozhestvennaya dekompozitsiya na empiricheskiye mody s adaptivnym shumom ceemdan kak metod resheniya osnovnykh problem primeneniya preobrazovaniya Gil'berta-Khuanga. *Zhurnal radioelektroniki.* 2016. N 9. S. 1–7.
- Nikitchuk T.M., Polishchuk Yu.A. Vykorystannya metodu fazovoyi ploshchyny dlya doslidzhennya pul'sovoyi khvyli. *Visnyk ZHDTU. Tekhnichni nauky.* 2011. N 2 (57). S. 80–87.
- Sviridova N., Sakai K. Human photoplethysmogram: new insight into chaotic characteristics. *Chaos, Solitons and Fractals* 77. 2015. P. 53–63.
- Tygliyan M.A., Tyurina N.N. Matematicheskaya model' prokhozheniya gemodinamicheskogo impul'sa cherez tochki bifurkatsii. Preprint IPM im. M.V. Keldysha. 2017. № 62. 18 s. doi:10.20948/prepr-2017-62.
- Zhaopeng Fan, Gong Zhang, Simon Liao. Clinical analysis for cardiovascular disease by calculating stiffness index, cardiac output from pulse wave. In *Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE'09. Canadian Conference on.* P. 478–481.
- Dehtyaruk V.I. Pulsovi protsesy v sertsevo-sudynniy sistemі lyudyny ta ikh vykorystannya dlya diahnostryky. *Komp'yuterni zasoby, merezhi ta systemy.* 2014. N 13. S. 43–52.

Одержано 08.10.2019