

## АЛГОРИТМ СТАТИСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ НА ОСНОВІ РЕЄСТРАЦІЇ ТА АНАЛІЗУ ФОТОПЛЕТИЗМОСИГНАЛІВ

У роботі розглянуто структурну схему інформаційної діагностичної системи на основі реєстрації та аналізу фотоплетизмосигналів. Здійснено аналіз алгоритму її функціонування в режимах навчання та прийняття рішень. Інформативними ознаками є коефіцієнти ортогонального розкладу математичного сподівання сигналу в базисі дискретних експоненціальних функцій, власні числа та власні вектори кореляційної матриці сигналу. Прийняття діагностичних рішень здійснюється з використанням критеріїв перевірки статистичних гіпотез.

*Ключові слова:* фотоплетизмосигнал, циклічність, інформаційна система, статистична діагностика, алгоритм, прийняття рішень, перевірка гіпотез, ортогональний розклад, власні числа, власні вектори

B.B. MLYNKO, M. YE. FRYZ

Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University

### ALGORITHM OF STATISTICAL DIAGNOSTICS ON THE BASIS OF PHOTOPLETHYSMOGRAPHIC SIGNAL PROCESSING

*Abstract – The aim of the paper is to present and analyse the algorithm of information system functioning for statistical medical diagnostics on the basis of photoplethysmographic signal processing.*

*Scientific-technical problem importance of information system development for medical diagnostics on the basis of photoplethysmographic signal statistical processing has been analysed. Photoplethysmographic signal is the rhythmic time dependence of the certain parts of human body transparency caused by variability of theirs blood filling. The structure of appropriate information system has been considered. The algorithm of its functioning in the modes of teaching and decision making has been analysed. Diagnostic characteristics are orthogonal decomposition coefficients of expectation of signal in the basis of discrete exponential functions, eigenvalues and eigenvectors of the covariance matrix of the signal. Decision making is implemented using criteria of statistical hypotheses testing.*

*Thus, the proposed algorithm specifies the functioning of appropriate information system and characterizes the integral methodology of its application. The algorithm is the foundation for diagnostic hardware and software development.*

*Keywords: photoplethysmographic signal, cyclicity, information system, statistical diagnostics, algorithm, decision making, hypotheses testing, orthogonal decomposition, eigenvalues, eigenvectors*

#### Вступ

При здійсненні діагностичних досліджень стану людського організму важливе значення мають неінвазивні методи, які виключають механічне чи хімічне втручання у його функціональні підсистеми. Серед них особливе місце займає метод медичної діагностики серцево-судинної системи, який ґрунтується на опроміненні певної ділянки тіла інфрачервоними променями світла та реєстрації коливальних інтенсивності відбитого чи розсіяного світла (фотоплетизмосигналів). Фотоплетизмосигнали (ФПС) – це зареєстровані у часі ритмічні зміни світлопроникності органів або частин тіла, обумовлені змінами величини їх кровонаповнення. Такі сигнали несуть інформацію про функціональний стан живих тканин організму за показниками динаміки кровонаповнення на рівні системи мікроциркуляції, яка відіграє першочергову роль у забезпеченні й підтримці гомеостазу тканин, розлади у функціонуванні системи мікроциркуляції є початком розвитку практично усіх патологічних процесів.

Області застосування фотоплетизмографії у медицині важко перерахувати: фізіологія, терапія, дерматологія, гінекологія, нейропатологія, стоматологія, педіатрія та ін. Клініцисти можуть використовувати її як додатковий метод для діагностики захворювань, а також у науково-дослідній роботі. Крім того, фотоплетизмографія має допоміжне діагностичне і прогностичне значення при вивченні багатьох серцево-судинних і нервових захворювань, що є зараз найчастішою причиною смерті й інвалідності у молодому віці. Деяку допомогу вона надає гігієністам, спортивним медикам, а також лікарям, що працюють в області космічної медицини.

Біофізичні аспекти породження фотоплетизмосигналів та сучасний стан технічних засобів для їх реєстрації висвітлено зокрема в роботах [1, 2].

Таким чином, створення інформаційних систем для задач медичної діагностики методом фотоплетизмографії є актуальною науково-технічною проблемою. В рамках цієї проблеми слід виділити такі задачі як побудова адекватної математичної моделі досліджуваного сигналу, виявлення відповідних інформативних параметрів, які мають діагностичне значення, розробка методів їх оцінювання за результатами вимірювань та методів прийняття діагностичних рішень. Розв'язання цих задач є основою синтезу структури інформаційної системи, алгоритмів функціонування її програмних та апаратних вузлів.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

ФПС за своєю природою є випадковими, тобто їхні реалізації змінюються від спостереження до спостереження. Тому в задачах моделювання та обробки ФПС використовують стохастичний підхід. Необхідно також враховувати ритмічну структуру ФПС, викликану циклічними скороченнями серця.

Найпоширенішим і найпростішим методом обробки ФПС є визначення та статистичний аналіз таких показників як максимуми, мінімуми, точки перегину отримуваних кривих, площі під кривими та ін. [3,

4]. Такі діагностичні ознаки є зрозумілими і звичними для лікарів, оскільки вони використовують їх у своїй практиці при постановці діагнозу по зареєстрованих сигналах “вручну”. Автоматизовані методи класифікації ФПС, що ґрунтуються на аналізі “форми” сигналу розглянуто в [1], при цьому використовуються також засоби попередньої фільтрації [1, 5]. Деякі кореляційні методи аналізу ФПС розглянуто в [2]. Автори [1] аналізують також можливість застосування методів нечіткої логіки для обробки діагностичних даних, в [6] для класифікації ФПС пропонується використовувати нейронні мережі. Згадані методи не враховують циклічності ФПС, а також не дозволяють здійснювати аналіз ймовірнісних розподілів сигналу.

У роботах [7, 8] побудовано математичну модель фотоплетизмосигналу у вигляді лінійного періодичного випадкового процесу. Ця модель відображає суть біофізичної інформації про породження ФПС, враховує стохастичність та ритмічність, дозволяє проводити його ймовірнісний аналіз методом характеристичних функцій. У роботі [9] модель ФПС зображено у вигляді умовного лінійного випадкового процесу, яка крім наведеного вище, дозволяє враховувати випадковість деяких біофізичних характеристик породження ФПС. На основі запропонованих математичних моделей у роботах [10, 11] здійснено ідентифікацію інформативних ознак ФПС з використанням його ортогональних розкладів, а у роботі [12] – запропоновано статистичні критерії прийняття діагностичних рішень. Не висвітлено однак цілісної методики використання запропонованих критеріїв в рамках функціонування відповідної інформаційної системи.

### Постановка завдання

Завданням даної статті є аналіз алгоритму роботи інформаційної діагностичної системи на основі реєстрації фотоплетизмосигналів. Алгоритм повинен охоплювати реєстрацію реалізацій ФПС, статистичну обробку з врахуванням циклічності, оцінювання інформативних параметрів, побудову діагностичних просторів, формулювання та перевірку статистичних гіпотез.

### Структура та алгоритм функціонування інформаційної системи

На рис. 1 наведено структурну схему комп'ютерної інформаційної системи, призначеної для реєстрації та аналізу фотоплетизмосигналів з метою здійснення медичної діагностики функціонального стану судинного русла [9]. На схемі використано такі позначення:

- БО – біологічний об'єкт (ділянка тканини організму, насичена кровонесними судинами);
- ОЕП – оптоелектронний перетворювач, який складається з таких елементів:
  - o блоку випромінювання (БВ) світлодіодного типу (довжина хвилі спектрального максимуму випромінювання – 0.94–0.96 мкм),
  - o оптичного каналу (ОК), який призначений для спрямування інфрачервоного випромінювання на БО,
- блоку прийому відбитого чи розсіяного БО випромінювання (БПВ);
- БРР – блок реєстрації реалізацій фотоплетизмосигналу;
- БОДП – блок статистичного оцінювання діагностичних параметрів;
- БДП – блок формування діагностичних просторів;
- БПР – блок прийняття діагностичних рішень.

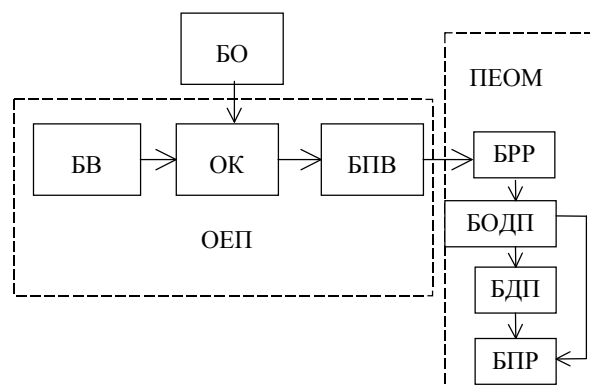


Рис. 1. Структурна схема інформаційної системи для реєстрації та аналізу фотоплетизмосигналів

Блок-схему розробленого алгоритму реєстрації та обробки фотоплетизмосигналів наведено на рис. 2 та на рис. 3. Першим етапом функціонування системи є відбір ФПС з допомогою оптоелектронного перетворювача (на виході перетворювача маємо ФПС з неперервним часом  $\xi(t), t \in (-\infty, \infty)$ ), аналого-цифрове перетворення (АЦП) з частотою дискретизації 140 Гц (на виході АЦП маємо ФПС з дискретним часом  $\xi_t, t \in \mathbf{Z}$ ) та реєстрація сигналу в пам'яті ЕОМ (результатом кожного вимірювального експерименту є реалізація ФПС  $(\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{n-1})$ , обсягом  $n$  відліків). На рис. 4 наведено приклад реалізації ФПС.

Система може працювати у двох режимах (блок 5 на рис. 2) – навчання та діагностики. Вибір режиму функціонування системи здійснюється її користувачем, якого далі будемо умовно називати

«оператором».

У режимі навчання спочатку здійснюється перевірка гіпотези про нормальний розподіл ФПС (оскільки наступні критерії прийняття рішень ґрунтуються саме на нормальності розподілу ФПС) за  $\chi^2$ -критерієм Пірсона [10] (блок 6). Якщо гіпотеза про нормальність розподілу не підтверджується, то оператор може прийняти рішення (блок 12) про завершення роботи або про повторну реєстрацію даних. Якщо ж гіпотеза про нормальність розподілу ФПС підтверджується, то далі здійснюється наступне: оцінювання періоду ФПС (блок 7), оцінювання діагностичних характеристик (блок 8), на основі чого далі встановлюється відповідність між отриманими значеннями діагностичних характеристик та патологією (блок 9), тобто здійснюється побудова діагностичних просторів. Зрозуміло, що на етапі навчання патологія пацієнта повинна бути апріорно відомою (встановлена іншими методами). Етап навчання системи у великій мірі залежить від кваліфікації спеціалістів-медиків.

У режимі діагностики (тобто, коли патологія пацієнта є невідомою і її необхідно встановити) спочатку також здійснюється перевірка розподілу ФПС на гауссовість (блок 13). Якщо ця гіпотеза не підтверджується, то оператор приймає рішення (блок 14) про завершення роботи або про повторну реєстрацію даних. При підтвердженні гіпотези про нормальність розподілу ФПС здійснюється оцінювання періоду (блок 15), після чого оператор приймає рішення (блок 16) щодо комплексу інформативних характеристик, за яким буде здійснюватись діагностика.

У розробленій інформаційній діагностичній системі передбачено три комплекси діагностичних ознак, можливість використання яких обґрунтовано в роботах [10–12]. А саме:

- коефіцієнти  $C_k, k = \overline{1, n_1}$  ортогонального розкладу математичного сподівання ФПС з використанням базису дискретних експоненціальних функцій (ДЕФ);
- власні числа  $\lambda_k, k = \overline{1, n_2}$  кореляційної матриці ФПС;
- власні вектори  $\varphi_k(t), t = \overline{0, n-1}, k = \overline{1, n_2}$  кореляційної матриці ФПС.

У роботі [12] обґрунтовано використання статистичних критеріїв перевірки гіпотез відносно кожного комплексу діагностичних ознак. Ці критерії стосуються перевірки гіпотез такого виду:

- перевірка основної гіпотези  $H_0: C_k = C_k^0, \forall k = \overline{1, n_1}$  проти альтернативи  $H_1: \exists k C_k \neq C_k^0, k = \overline{1, n_1}$ , де  $C_k^0, k = \overline{1, n_1}$  – гіпотетичні коефіцієнти ортогонального розкладу ФПС в базисі ДЕФ, отримані на етапі навчання системи, які відповідають певній патології;
- перевірка основної гіпотези  $H_0: \lambda_k = \lambda_k^0, \forall k = \overline{1, n_2}$  проти альтернативи  $H_1: \exists k \lambda_k \neq \lambda_k^0, k = \overline{1, n_2}$ , де  $\lambda_k^0, k = \overline{1, n_2}$  – гіпотетичні власні числа кореляційної матриці ФПС, отримані на етапі навчання системи, які відповідають певній патології;

- перевірка основної гіпотези  $H_0: \varphi_k(t) = \varphi_k^0(t), t = \overline{0, n-1}, \forall k = \overline{1, n_2}$  проти альтернативи  $H_1: \exists k \varphi_k(t) \neq \varphi_k^0(t), t = \overline{0, n-1}, k = \overline{1, n_2}$ , де  $\varphi_k^0(t), t = \overline{0, n-1}, k = \overline{1, n_2}$  – власні вектори кореляційної матриці ФПС, отримані на етапі навчання системи, які відповідають певній патології.

Якщо оператор прийняв рішення про перевірку гіпотези на основі коефіцієнтів ортогонального розкладу  $C_k, k = \overline{1, n_1}$ , то здійснюється формулювання гіпотез (блок 17), оцінюються коефіцієнти ортогонального розкладу (блок 18) на основі зареєстрованої реалізації ФПС, після чого гіпотеза приймається або відхиляється (блок 19) на основі відповідного статистичного критерію. Потім оператор (блок 20) може або завершити роботу, або перейти до перевірки гіпотез за іншими комплексами діагностичних ознак.

Якщо оператор прийняв рішення про перевірку гіпотез щодо власних чисел  $\lambda_k, k = \overline{1, n_2}$ , то здійснюється формулювання цих гіпотез (блок 21), оцінювання власних чисел на основі оцінки кореляційної матриці ФПС (блок 22), після чого, з використанням статистичного критерію, гіпотеза або приймається, або відхиляється (блок 23). Далі оператор (блок 24) або завершує роботу, або переходить до діагностики за іншим комплексом діагностичних ознак.

При перевірці гіпотез відносно власних векторів  $\varphi_k(t), t = \overline{0, n-1}, k = \overline{1, n_2}$  здійснюється формулювання гіпотез (блок 25), оцінювання власних векторів на основі оцінки кореляційної матриці ФПС (блок 26), використання статистичного критерію для прийняття чи відхилення гіпотези (блок 27).

При підтвердженні гіпотези на основі власних векторів (блок 28) оператор може ще перевірити гіпотезу про власні числа (блоки 31–33), причому, у даному випадку використовується статистичний критерій, який враховує те, що гіпотеза про власні вектори підтвердилась [12].

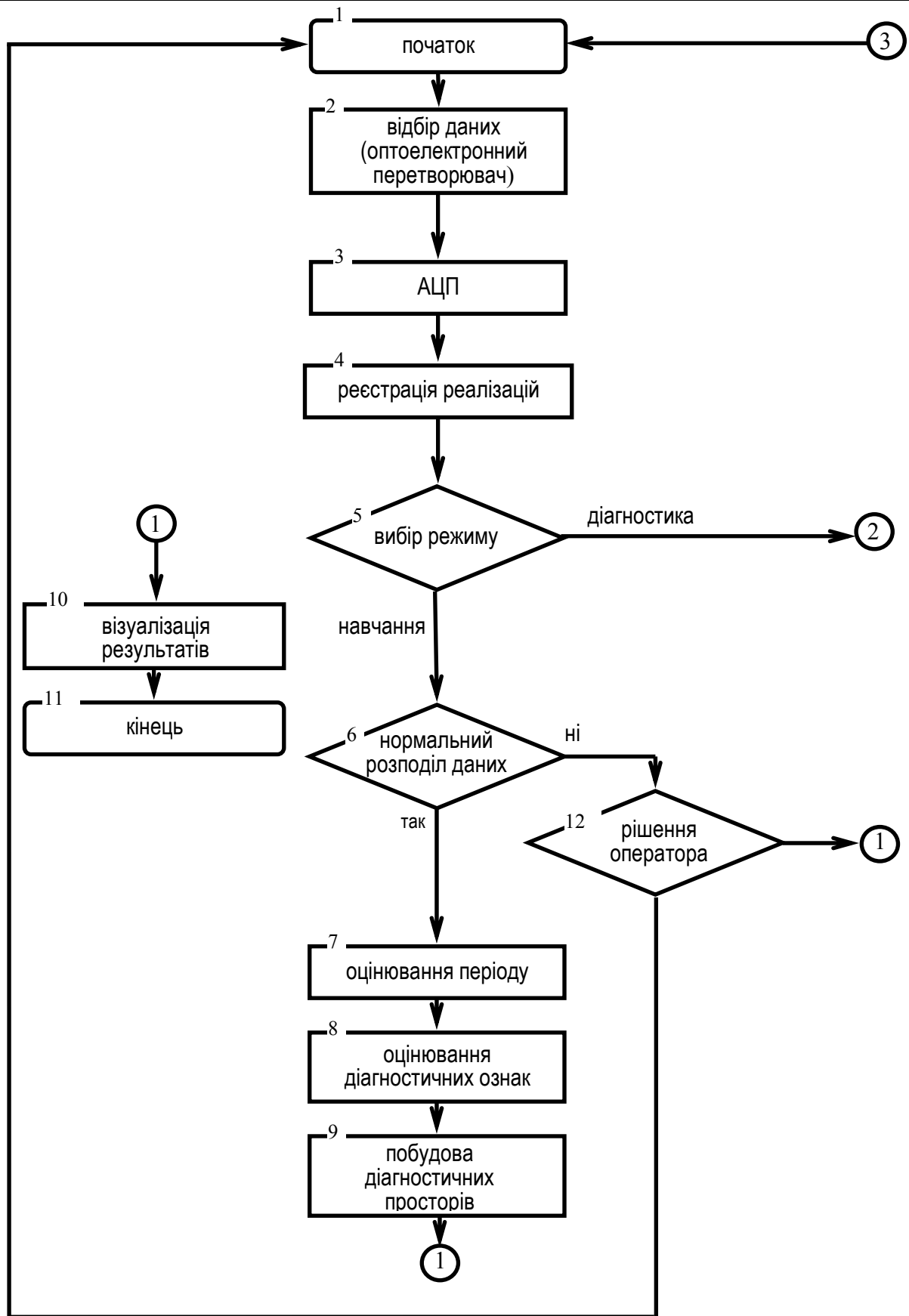


Рис. 2. Алгоритм функціонування інформаційної системи

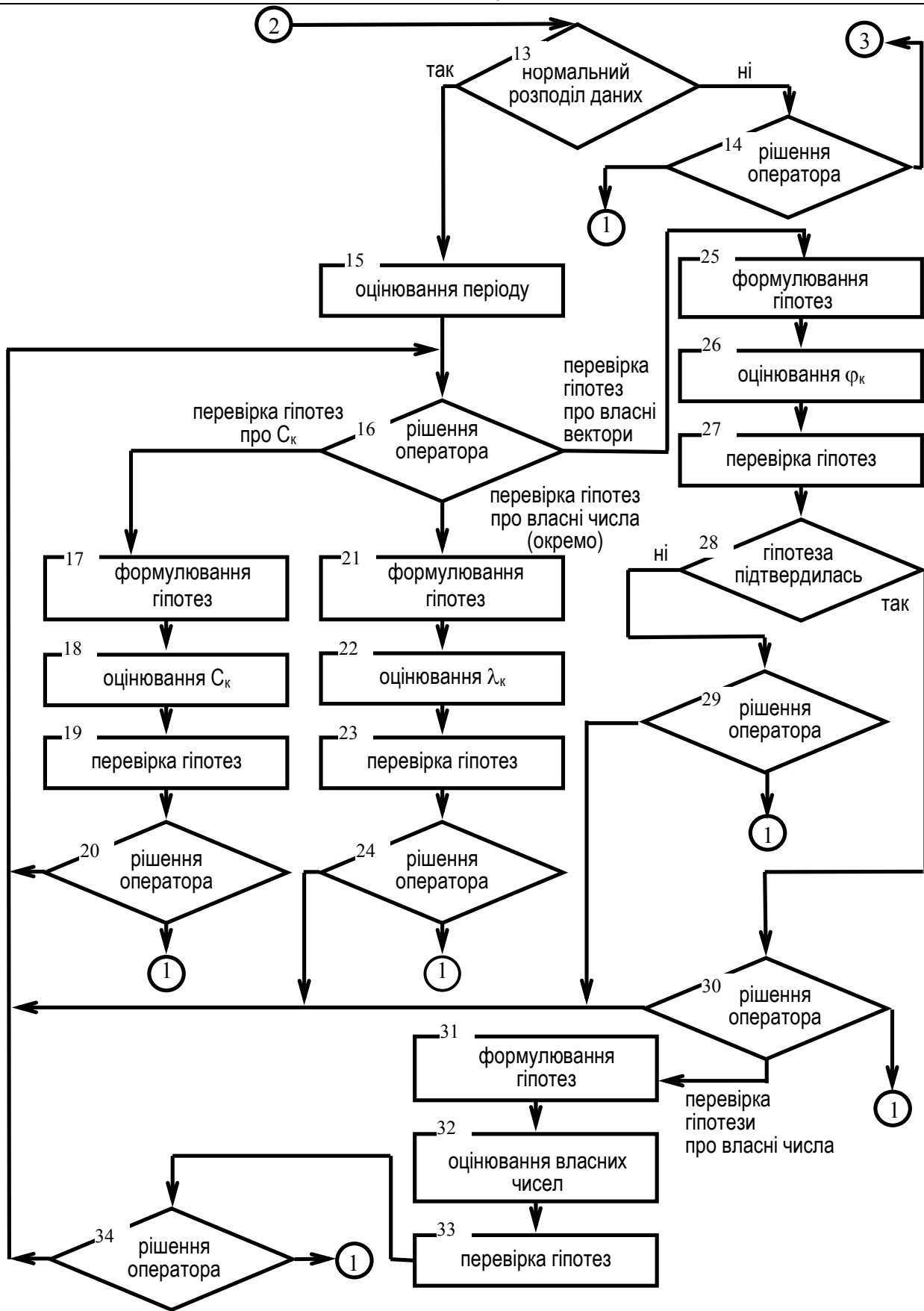


Рис. 3. Алгоритм функціонування інформаційної системи (продовження)

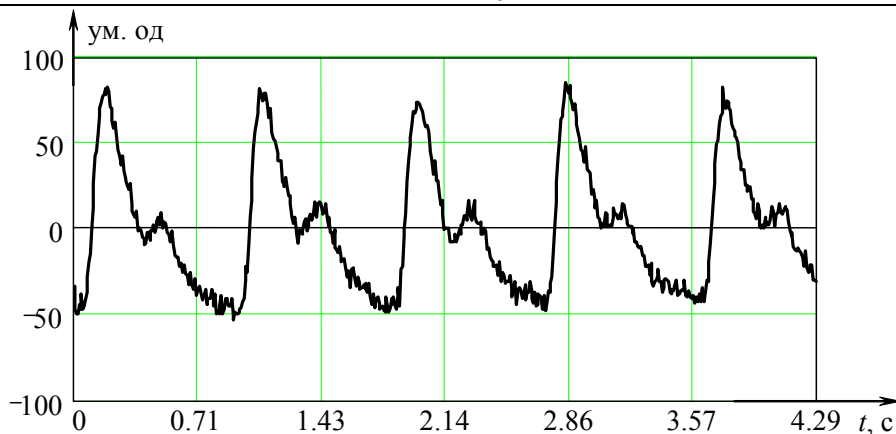


Рис. 4. Приклад зареєстрованої реалізації фотоплетизмосигналу

### Висновки

Таким чином, запропонований у роботі алгоритм реєстрації та статистичного аналізу фотоплетизмосигналів описує функціонування відповідної інформаційної системи та характеризує цілісну методику її використання при здійсненні медичної діагностики серцево-судинної системи організму людини. Розроблений алгоритм є основою для створення відповідних технічних та програмних засобів діагностики.

### Література

1. Фотоплетизмографічні технології контролю серцево-судинної системи : [монографія] / С. В. Павлов, В. П. Кожем'яко, В. Г. Петрук, П. Ф. Колісник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ. – Вінниця, 2007. – 254 с.
2. Rhee S. Design and Analysis of Artifact-Resistive Finger Photoplethysmographic Sensors for Vital Sign Monitoring : Ph.D. Thesis at the Massachusetts Institute of Technology / S. Rhee. – Massachusetts, 2000. – 101 p.
3. Десова А. А. Компьютерная система диагностики на базе анализа ритмической структуры пульсового сигнала лучевой артерии / А. А. Десова, Ю. С. Легович, О. С. Разин // Медицинская техника. – 1999. – № 3. – С. 3–5.
4. Мерсер Д. Аналитические методы исследования периодических процессов, замаскированных случайными флуктуациями / Д. Мерсер // Биологические часы. – М. : Мир, 1964. – С. 126–152.
5. Pilt K. Photoplethysmographic signal processing using adaptive sum comb filter for pulse delay measurement / K. Pilt, K. Meigas, R. Ferenets, J. Kaik // Estonian Journal of Engineering. – 2010. – no.16. – P. 78–94.
6. Soltane M. Artificial Neural Networks Approach to PPG Signal Classification / M. Soltane, M. Ismail, Z. A. Abdul Rashid // International Journal of Computing & Information Sciences. – 2004. – Vol. 2, no. 1. – P. 58–65.
7. Марченко Б. Математична модель фотоплетизмосигналу – основа ідентифікації інформативних ознак / Б. Марченко, Б. Млинко, М. Фриз // Міжнародний науковий журнал «Комп'ютинг». – 2005. – Т. 5, № 2. – С. 73–82.
8. Марченко Б. Г. Визначення основних ймовірнісних характеристик фотоплетизмосигналу з використанням моделі лінійного періодичного випадкового процесу / Б. Г. Марченко, Б. Б. Млинко, М. Є. Фриз // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 136–141.
9. Fryz M. Conditional Linear Periodical Random Process as a Mathematical Model of Photoplethysmographic Signal / M. Fryz, B. Mlynko, O. Mul, N. Zagorodna // Scientific Journal of Riga Technical University. – 2010. – Vol. 45. – P. 82–86.
10. Млинко Б. Б. Ідентифікація та оцінювання діагностичних параметрів на основі аналізу фотоплетизмограми / Б. Б. Млинко, М. Є. Фриз // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2002. – Т. 7, Число 4. – С. 81–87.
11. Марченко Б. Г. Ідентифікація інформативних ознак фотоплетизмосигналу методом ортогональних перетворень / Б. Г. Марченко, Н. Б. Марченко, Б. Б. Млинко, М. Є. Фриз // Наукові праці Національного авіаційного університету. Серія: Електроніка та системи управління. – 2008. – № 3 (17). – С. 47–51.
12. Млинко Б. Б. Статистична діагностика судинної системи на основі аналізу фотоплетизмографічного сигналу / Б. Б. Млинко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2004. – № 2 – С. 123–128.

### References

1. S. V. Pavlov, V. P. Kozhemiako, V. G. Petruk, P. F. Kolisnyk, Fotopletyzmozografichni tehnologii kontroly sertsevo-sudynnoi systemy, Vinnytsia : UNIVERSUM, 2007 [in Ukrainian].
2. S. Rhee, Design and Analysis of Artifact-Resistive Finger Photoplethysmographic Sensors for Vital Sign Monitoring : Ph.D. Thesis at the Massachusetts Institute of Technology, 2000.

3. A. Desova, "Kompyuternaya sistema diagnostiki na baze analiza ritmicheskoi struktury pulsovogogo signala luchevoi arterii," *Medycynskaya tekhnika*, Issue 3, 1999, pp. 3–5 [in Russian].
4. D. Merser, "Analiticheskie metody issledovaniya periodicheskikh processov, zamaskirovannykh sluchainymi fluktuatsiyami," *Biologicheskies chasy*, Moskva : Mir, 1964, pp. 126–152 [in Russian].
5. K. Pilt, K. Meigas, R. Ferenets, J. Kaik, "Photoplethysmographic signal processing using adaptive sum comb filter for pulse delay measurement," *Estonian Journal of Engineering*, no. 16, 2010, pp. 78–94.
6. M. Soltane, M. Ismail, Z. A. Abdul Rashid, "Artificial Neural Networks Approach to PPG Signal Classification," *International Journal of Computing & Information Sciences*, vol. 2, no. 1, 2004, pp. 58–65.
7. Martchenko, B. Mlynko, M. Fryz, "Mathematical Model of Photoplethysmic Signal as the Base for Informational Parameters Identification," *International Scientific Journal of "Computing"*, vol. 5, issue 2, 2005, pp. 73–82 [in Ukrainian].
8. G. Marchenko, B. B. Mlynko, M. Ye. Fryz, "Vyznachennia osnovnykh imovirnisnykh kharakterystyk fotopletyzmosygnalu z vykorystanniam modeli liniynogo periodychnogo vypadkovogo protsesu," *Visnyk Ternopil'skogo derazhavnogo tekhnichnogo universytetu*, Vol. 11, Issue 2, 2006, pp. 136–141 [in Ukrainian].
9. M. Fryz, B. Mlynko, O. Mul, N. Zagorodna, "Conditional Linear Periodical Random Process as a Mathematical Model of Photoplethysmographic Signal," *Scientific Journal of Riga Technical University*, vol. 45, 2010, pp. 82–86.
10. B. B. Mlynko, M. Ye. Fryz, "Identyfikatsiya ta otsinuvannia diagnostychnykh parametriv na osnovi analizu fotopletyzmogramy," *Visnyk Ternopil'skogo derazhavnogo tekhnichnogo universytetu*, Vol. 7, Issue 4, 2002, pp. 81–87 [in Ukrainian].
11. B. G. Marchenko, N. B. Marchenko, B. B. Mlynko, M. Ye. Fryz, "Identyfikatsiya informatyvnykh oznak fotopletyzmosygnalu metodom ortogonalnykh peretvoren", *Elektronika ta systemy upravlinna*, Issue 3(17), 2008, pp. 47–51 [in Ukrainian].
12. B. B. Mlynko, "Statystychna diagnostyka sudynnoi systemy na osnovi analizu fotopletyzmografichnogo sygnalu," *Optyko-elektronni informatsiyno-energetychni tekhnologii*, Issue 2, 2004, pp. 123–128 [in Ukrainian].

Рецензія/Peer review : 5.4.2013 р. Надрукована/Printed :18.6.2013 р.  
Рецензент: д.т.н., проф., завідувач кафедрою комп'ютерних систем та мереж  
ТНТУ ім. І. Пулюя Лупенко С. А.