МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

**ХВОСТІВСЬКА ЛІЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА**

УДК 612.16:616.13:519.218:004.67

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ ПУЛЬСОВОГО СИГНАЛУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФІЧНИХ СИСТЕМ

01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи

**АВТОРЕФЕРАТ**
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2021

Дисертацією є рукопис.
Роботу виконано у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор
**Яворський Богдан Іванович,**
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
професор кафедри радіотехнічних систем, м. Тернопіль.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор
**Висоцька Олена Володимирівна**,
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,
завідувач кафедри радіоелектронних та біомедичних комп`ютеризованих засобів та технологій, м. Харків;

доктор технічних наук, доцент
**Сверстюк Андрій Степанович**,
Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського,
доцент кафедри медичної інформатики, м. Тернопіль

Захист відбудеться "*23*" *квітня* 2021 р. о *11*$^{00}$ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.01 в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79).

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий "*22*" *березня* 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Б.Г. Шелестовський

# ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми**. За даними ВООЗ та Всесвітньої федерації серця на 2020 р., показники смертності від захворювання серцево-судинної системи у світі займають перше місце (31% від усіх захворювань). В розподілі захворювань серцево-судинної системи значна частка належить інфарктам (45%) та інсультам (29%) першопричинами розвитку яких є зміна еластичності судин, зумовлена змінною їх ригідності (жорсткості). Зміна ригідності судин відбувається під дією таких факторів ризику, як порушений ліпідний обмін, артеріальна гіпертонія, цукровий діабет, забруднення довкілля, шкідливі звички, емоційні стреси, генетична спадковість та інші. Тому, важливою проблемою сучасної медицини є зменшення показників смертності від розвитку ригідності судин шляхом своєчасної діагностики та профілактики захворювання.

Актуальність діагностування стану судин людини за пульсовим сигналом (ПС), який відображає періодичне об’ємне коливання стінок судин під дією артеріального та венозного кровотоку, підтверджено авторами багатьох праць медичного (Айвар Ю.П., Буничева А.Я., Мухин С.И., Лебедев П.А. та інші) та технічного (Михайлов Н.Ю., Злепко С.М., Павлов С.В., Рибін О. І., Шарпан О.Б., Кожем'яко В.П., Сторчун Ю.Є., Мужицька Н.В., Тимчик Г.С., Млинко Б.Б., Webster J.G. та інші) спрямувань. Авторами встановлено, що регулярна та своєчасна діагностика стану судин людини за ПС дає змогу відстежити динаміку розвитку захворювання судин.

Застосування фотоплетизмографічного методу (ФМ) щодо реєстрації ПС на відміну від сфігмографії, флебосфігмографії, плетизмографії забезпечує повну неінвазивність, високу роздільну здатність та точність, можливість подальшого аналізу, візуалізацію та добовий моніторинг.

Фотоплетизмографічні системи (оптоелектронний діагностичний комплекс (Україна), Endo-Pat2000 (Ізраїль), ELACAT (Німеччина), ЭЛДАР (Росія), PulseTrace PCA2 (США), Senzio (Голандія) та інші), які реалізовано на ФМ, забезпечують процес формування інформативних (діагностичних) ознак (амплітудно-часові параметри хвиль ПС, індекс відбивання, швидкість поширення ПС, індекс жорсткості, амплітудно-частотна характеристика, оцінка математичного сподівання) як показників стану судин людини.

Ефективність та кількість інформативних ознак, які формують фотоплетизмографічні системи про стан судин людини визначаються адекватністю математичної моделі та розроблених на її основі методів аналізу ПС та відповідного програмного забезпечення.

Аналіз відомих математичних моделей ПС показав, що вони побудовані на базі детермінованого та стохастичного підходах, зокрема:

- детерміновані моделі: лінеаризовані рівняння Нав’є-Стокса в циліндричних координатах (Благітко Б., Заячук І., Пирогов О.); синусоїда з експоненційним затуханням (Акулов В.А.); гармонічна трифазна модель (В.В.Гніліцький, Н.В. Мужицька); гармонічний осцилятор з експоненціальним затуханням (Михайлов Н.Ю., Толмачев Г.Н.); рівняння Кортевега Де Фриза та метод Хірота (Дармаєв Т.Г., Цибіков А.С, Хабітуєв Б.В.);

- стохастичні моделі: стаціонарний випадковий процес (Баєвский Р.М., Кирилов О.И., Клецкін С.З.); адитивна суміш детермінованої і випадкової складових (Самков С.В., Черненко А.И.); лінійний випадковий процес (Марченко Б.Г., Млинко Б.Б., Фриз М.Є); адаптивна негармонічна модель (Han-Kuei Wu, Hau-Tieng Wu, Chun-Li Wang, Yueh-Lung Yang, Tung-Hu Tsai, Wen-Hsiang Wu, Hen-Hong Chang); лінійний періодичний випадковий процес (Млинко Б.Б., Пастух О.А., Фриз М.Є.).

Неврахування у структурах відомих моделей кореляційної взаємопов'язаності між різними хвилями (циклами) однієї і тієї ж реалізації ПС не уможливлює відстеження динаміки зміни фазово-часової структури з метою виявлення змін у функціонуванні судин людини, зокрема ригідності, на початкових стадіях розвитку захворювання.

Наведені аргументи вказують на актуальність наукового дослідження, яке полягає в обґрунтуванні математичної моделі пульсового сигналу та розробленні на її основі методів аналізу для підвищення інформативності фотоплетизмографічних систем шляхом впровадження в область діагностики стану судин людини нових інформативних ознак як показників ригідності.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота є складовою частиною наукової роботи Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Окремі результати роботи були отримані при виконанні наукової теми ВК 51-15 – «Методи та засоби виявлення патологічних станів для систем медичного контролю функціонального стану організму людини», інвентарний номер державної реєстрації № 0115U002455, 2015-2017 рр. Дисертанту належить розробка програмного забезпечення та статистичного аналізу пульсових сигналів та проведення серії статистичних експериментів.

**Мета і задачі дослідження**. *Метою дослідження* є обґрунтування математичної моделі та розроблення методів аналізу пульсового сигналу для підвищення інформативності фотоплетизмографічних систем. Досягнення цієї мети вимагає розв'язання таких задач:

1. Проаналізувати стан справ та тенденції розвитку математичних моделей пульсового сигналу та методів їх аналізу для обґрунтування напрямку наукового дослідження.
2. Обґрунтувати структуру математичної моделі пульсового сигналу для розв'язання задачі дослідження динаміки зміни фазо-часових параметрів як чутливого показника стану ригідності судин.
3. Розробити методи та алгоритми аналізу пульсового сигналу на основі обґрунтованої математичної моделі зорієнтованих на підвищення інформативності фотоплетизмографічних систем шляхом отримання нових інформативних ознак як індикаторів стану ригідності судин.
4. Розробити методи та алгоритми верифікації і валідації методів аналізу пульсового сигналу для обґрунтування вибору рішення про затвердження їх результатів.
5. Розробити дослідний макет фотоплетизмографічної системи та програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання пульсового сигналу та

верифікації і валідації результатів його статистичного аналізу.

*Об'єкт дослідження*: процес моделювання та аналізу пульсового сигналу для підвищення інформативності фотоплетизмографічних систем.

*Предмет дослідження*: математична модель та методи аналізу пульсового сигналу, їх властивості та можливості для підвищення інформативності фотоплетизмографічних систем.

**Методи дослідження** побудовано на основі енергетичної теорії стохастичних сигналів, а саме застосовність періодично корельованого випадкового процесу для обґрунтування математичної структури пульсового сигналу і його оцінювання, статистичної теорії вибору та прийняття рішень при верифікації і валідації методів аналізу пульсового сигналу. Для реалізації алгоритмів аналізу у виді програмного забезпечення застосовано середовище MATLAB R2014a.

**Наукова новизна одержаних результатів**:

1. Вперше обґрунтовано математичну модель пульсового сигналу у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, що уможливило врахування кореляційної взаємопов’язаності між різними хвилями (циклами) однієї і тієї ж його реалізації для відстеження динаміки зміни фазо-часових параметрів як чутливого показника стану ригідності судин, чим підвищено інформативність результатів аналізу пульсового сигналу.
2. Вперше розроблено обчислювальний метод оцінювання періоду пульсового сигналу на основі процедури пошуку мінімуму функції варіації середніх значень центрованого сигналу, чим підвищено точність аналізу сигналу у складі фотоплетизмографічних систем за рахунок зменшення розмитості обчислених оцінок інформативних ознак.
3. Вперше обґрунтовано застосування в області діагностики стану судин людини інформативних ознак пульсового сигналу – кореляційних компонент, які адекватно відображають стан ригідності судин.
4. Розроблено імітаційну модель пульсового сигналу як періодично подовжені в часовому просторі суми двох часозміщених функцій нормального (гаусового) розподілу з врахуванням властивостей періодичності (циклічності), стохастичності амплітудних та фазо-часових показників, що уможливило верифікувати методи та алгоритми аналізу.

**Практичне значення одержаних результатів**. Полягає у тому, що на базі запропонованої моделі пульсового сигналу удосконалено відомі методи та алгоритми його аналізу, які дають змогу підвищити інформативність фотоплетизмографічних систем шляхом запровадження в галузь діагностики стану судин нового класу чутливо-інформативних ознак у виді кореляційних компонент. Розроблена комп’ютерна імітаційна модель пульсового сигналу є придатною для тестування (верифікації) алгоритмів аналізу даних, одержаних у медичних установах.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено при виконанні наукових досліджень: в ТзОВ «Медичний центр ВІТАМІН» та навчальному процесі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

**Особистий внесок**. Основні результати, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані дисертантом самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: у праці [1] – обґрунтування застосування енергетичної теорії стохастичних сигналів для вибору математичної моделі сигналів пульсової природи у вигляді імпульсного періодично корельованого випадкового процесу; у працях [2,7] – обґрунтування структури математичної моделі пульсового сигналу у вигляді періодично корельованого випадкового процесу; у працях [3,11] – розроблення дослідного макету інформаційної системи для реєстрації та обробки пульсового сигналу; у працях [4,13] – розроблення математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення для імітування пульсового сигналу судин людини; у праці [5] – розроблення математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення для імітування добового пульсового сигналу судин людини; у працях [6,19] – розроблення методу та алгоритму обчислення періоду стохастичного біомедичного сигналу з показниками високої роздільної здатності та швидкодії для використання у біомедичних комп'ютерно-діагностичних системах; у праці [8] – обґрунтовано застосування синфазного та компонентного методів до аналізу пульсового сигналу як періодично корельованого випадкового процесу; у праці [9] – проаналізовано пульсовий сигнал як періодично корельований випадковий процес синфазним методом; у праці [10] – проаналізовано пульсовий сигнал як періодично корельований випадковий процес компонентним методом; у праці [12] – проаналізовано відомі математичні моделі пульсового сигналу; у праці [14] – проаналізовано варіацію фазо-часових параметрів пульсової хвилі при зміні стану ригідності судини людини; у праці [15] – запропоновано методи та алгоритми верифікації синфазного та компонентного методів аналізу пульсового сигналу; у праці [16] – дано розвиток теорії періодично корельованих випадкових процесів як моделей стохастичних сигналів із властивістю змінної періодичності; у праці [17] – розроблено метод валідації синфазного та компонентного методів аналізу пульсового сигналу із використанням F-критерію (критерію Фішера); у праці [18] – розроблено комп'ютерну систему для задачі діагностування функціонального стану судин системи людини; у праці [20] – розроблено комп'ютерний генератор тестових сигналів для генерувати пульсових хвиль різного генезису із різними станами та амплітудно-часовими параметрами; у праці [21] – розроблено математичну модель та метод аналізу пульсового сигналу як змінно-періодично корельованого стохастичного процесу для побудови нових алгоритмічних та програмних комп'ютерних систем для діагностики кровоносних судин людини.

В цілому робота доповідалася на науковому семінарі кафедри економіко-математичного моделювання та інформаційних технологій Національного університету «Острозька академія» (м. Острог) та науковому семінарі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль).

**Публікації.** Основні результати досліджень, що відображені у дисертаційній роботі, опубліковано у 21 наукових працях: з них у 6 статтях, що входять до переліку наукових фахових видань України з технічних наук (2 з яких у виданнях, що зареєстровані у наукометричних базах даних з міжнародним індексом

цитування «Web of Science, «DOAJ»), 3 статті в міжнародних періодичних виданнях (зареєстровані у наукометричних базах даних з міжнародним індексом цитування («Index Copernicus», «Google Scholar»), 2 статті в міжнародних періодичних виданнях (зареєстровані у наукометричних базах даних з міжнародним індексом цитування («Polish Scholarly Bibliography»), 1 стаття в міжнародних періодичних виданнях (зареєстровані у наукометричних базах даних з міжнародним індексом цитування («Ulrich's Web Global Serials Directory», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services») та 15 тез доповідей у працях міжнародних та всеукраїнських наукових та науково-технічних конференцій.

**Структура та обсяг.** Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 177 сторінок, з яких 118 сторінок основного тексту, 4 додатки на 21 сторінці, список літератури налічує 127 джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** шляхом аналізу стану задачі обґрунтування структури математичної моделі та розроблення методів аналізу пульсового сигналу для підвищення інформативності фотоплетизмографічних систем обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, розкрито питання апробації результатів дисертації на конференціях і семінарах та висвітлення їх у друкованих працях.

**У першому розділі** на основі аналітичного огляду літературних джерел розкрито стан та особливості розвитку математичних моделей пульсових сигналів та методів їх аналізу для виявлення своєчасних змін у функціонуванні стану судин людини, зокрема їх ригідності (жорсткості) як першопричини смертності від серцево-судинних захворювань (ССЗ).

Виявлено, що відомі діагностичні параметри пульсового сигналу (формуються фотоплетизмографічними системи шляхом аналізу ПС на базі детермінованих та стохастичних математичних моделей) як показники рівня ригідності судин – часові та частотні характеристики не враховують викликані зміни у часі діагностично цінних параметрів (важливо для своєчасної діагностики та профілактики судин).

Аналіз робіт з дослідження стану судин показав, що динаміка зміни фазо-часової структури ПС на кожному серцевому циклі слугує чутливим діагностичним параметром при своєчасному виявленні змін у ригідності судин.

Показана необхідність концепції і принципів побудови математичної моделі ПС та методів її аналізу для розв'язання задачі дослідження динаміки зміни фазо-часових параметрів як чутливого показника стану ригідності судин.

**У другому розділі** розроблено метод, алгоритм та програмне забезпечення для обчислення періоду пульсового сигналу. Сформульовано вимоги до математичної моделі пульсових сигналів та обґрунтовано її вибір.

Метод обчислення періоду пульсового сигналу у складі фотоплетизмографічних систем базуються на процедурі пошуку мінімуму функції варіації середніх значень норм центрованого пульсового сигналу:

Рис.1. Блок-схема обчислення періоду ПС

$$\hat{T} = \arg\min_T \left( M_\xi(T); [T_{\min}; T_{\max}] \right), \qquad (1)$$

де $M_\xi(T)$ - функція варіації середніх значень норм центрованого ПС:

$$M_\xi(T) = \inf_{\forall D(T \in [T_{\min}; T_{\max}]) t \in \mathrm{R}} \left( M_t \left\{ \left| \overset{0}{\xi}(t,T) \right| \right\} \right), \qquad (2)$$

де $\overset{0}{\xi}(t,T)$ – центрований ПС:

$$\overset{0}{\xi}(t,T) = \xi(t) - \hat{m}_\xi(t,T), \; t \in \mathrm{R}, \; T \in [T_{\min}; T_{\max}], \qquad (3)$$

де $\xi(t)$ – реалізація ПС;

$\hat{m}_\xi(t,T)$ – періодично подовжені в часовому просторі з періодом $T$ реалізації оцінок математичного сподівання ПС $\xi(t)$.

На базі виразів (1-3) розроблено блок-схему обчислення періоду ПС, яку зображено на рис.1.

Результат обчислення варіації середніх значень норм центрованого ПС $M_\xi(T)$ згідно алгоритму (рис.1) емпіричного ПС зображено на рис.2.

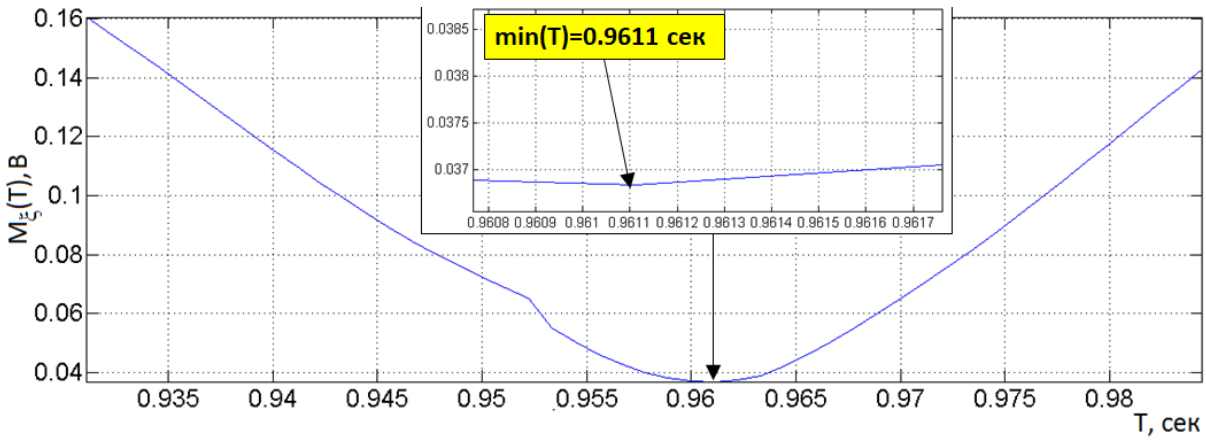



Рис. 2. Графік залежності варіації середніх значень норм центрованого ПС $M_\xi(T)$ з чітко вираженим мінімумом, який відповідає значенню періоду ПС (0,9611 сек)

Для порівняння результатів обчислення періоду ПС різними методами (алгоритмами) застосовано як критерій мінімальне значення розмаху середньоквадритного відхилення (СКВ) ансамблю реалізацій ПС при різних значеннях періодів згідно виразу:

$$\hat{T} = \min(\hat{\sigma}_{\xi}(t,T_k)) = \min(\sum_{n=1}^{N}(\xi_n(t,T_k) - m_{\xi}(t,T_k))^2), t \in [0,T_k), k = \overline{1,K} \qquad (4)$$

де $T_k$ – значення періоду (апріорно визначене), яке визначене $k$-им методом; $m_{\xi}(t,T_k)$ – математичне сподівання реалізації $\xi(t)$ з періодом $T_k$; $K$ – кількість визначених періодів; $N$ – кількість реалізацій ансамблів $\xi_n(t,T_k)$ у реалізації ПС $\xi(t)$ із періодом $T_k$.

На рис.3. зображено результати оцінювання СКВ $\hat{\sigma}_{\xi}(t,T_k)$, де позначено через T1 – період, обчислений методом екстремальних значень, T2 – період, обчислений методом усереднення інтервалів часу між максимальними значеннями автокореляційної функції та амплітудних спектрів сигналу, T3 – період, обчислений методом усереднення інтервалів між максимальними значеннями спектральної густини потужності сигналу, T4 – період, обчислений методом максимумуму функції варіації математичного сподівання та T5 – період оцінений запропонованим методом.

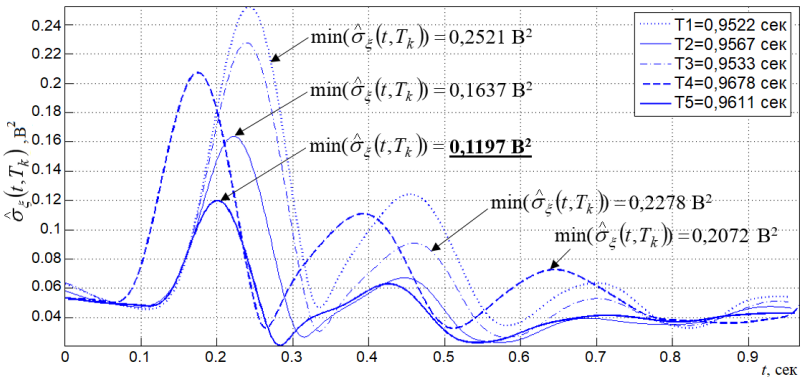



Рис.3. Реалізації СКВ $\hat{\sigma}_{\xi}(t,T_k)$ ПС для різних значень періоду, обчисленого відомими та розробленим методами

На рис.3 видно, що реалізація ПС із періодом $T$=0,9611 сек, визначеним розробленим методом, має найменший розмах СКВ $\hat{\sigma}_{\xi}(t,T_k)$. Отже отримані результати підтверджують актуальність застосування мінімуму функції варіації середніх значень центрованого ПС для оптимального визначення періоду ПС.

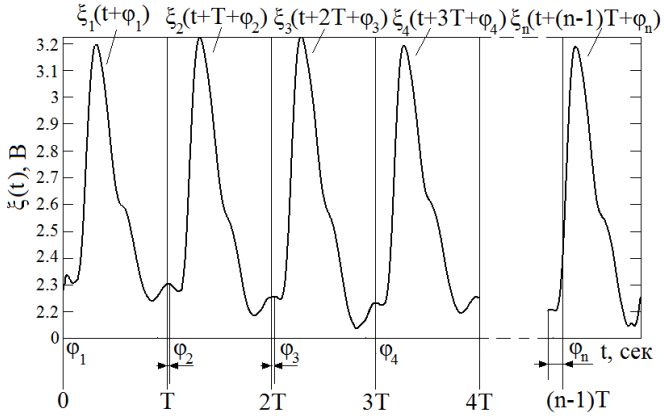



Рис.4. Фазо-часова структура ПС

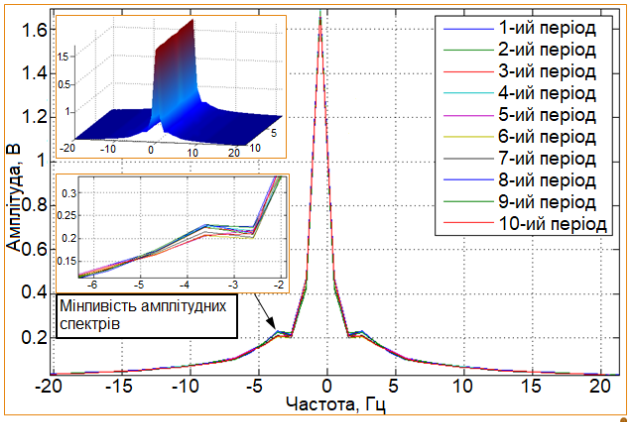
Для обґрунтування структури математичної моделі ПС проаналізовано його фазо-часову структуру та характеристики методами, які базуються на детермінованому і стохастичному підходах щодо їх побудови.

Динаміку зміни фазо-часової структури експериментального ПС як індикатора зміни ригідності судин зображено на рис.4.

Аналізом цієї структури (рис.4) встановлено, що при кожному $n$-ому серцевому циклі, який рівний періоду сигналу $T$, відмічається змінна фаз від $\varphi_1$–$\varphi_n$ пульсових хвиль $\xi_1(t)$–$\xi_n(t)$. Такі зсуви фаз складових ПС відносно періоду коливань відбуваються за рахунок мінімальних змін у стані судин, зокрема при змінні їх ригідності. Також встановлено, що математична модель ПС повинна забезпечити

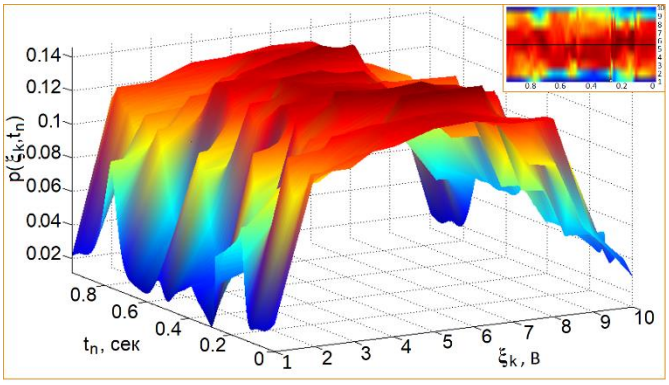
можливість дослідження динаміки цієї структури (рис.4) при кожному серцевому циклі (періодові) для визначення показників ригідності судин людини.

Результати аналізу ПС методами гармонічного аналізу у рамках детермінованого підходу при попередньо визначеному періоді сигналу $T$ підтверджують факт наявності в сигналі стохастичної складової за мінливістю амплітудних спектрів різних періодів ПС (рис.5). Розглядаючи ПС у рамках стаціонарної моделі з позицій стохастичного підходу, помічено, що функції густини розподілу (рис.6) трансформуються в часі, що свідчить про факт нестаціонарності сигналу.




$S_f(\xi_1(t)) \neq S_f(\xi_2(t+2T)) \neq \ldots \neq S_f(\xi_k(t+kT))$ - випадковість

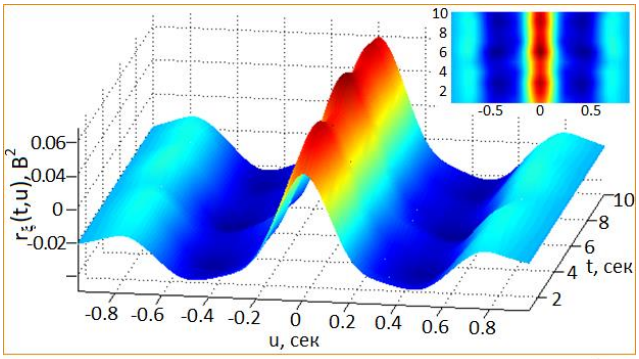
Рис. 5. Графік реалізації амплітудних спектрів ПС (норма)




$p(\xi_1 \ldots \xi_k, t_1 \ldots t_n) \neq p(\xi_1 \ldots \xi_k, t_1 + \tau \ldots t_n + \tau)$ - нестаціонарність

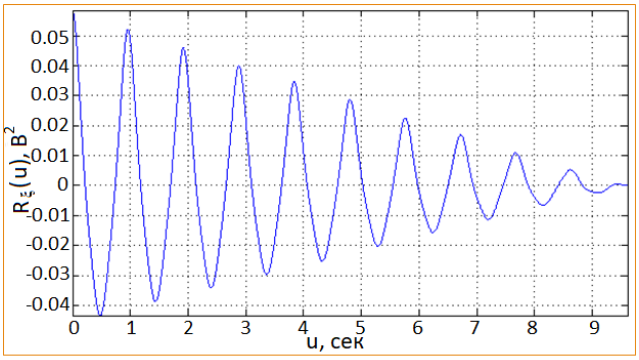
Рис. 6. Густини розподілу ймовірностей реалізацій ПС $p(\xi_k, t_n)$

За результатами кореляційного аналізу ПС встановлено, що кореляційна функція ПС $r_\xi(t,u)$ як ансамблю реалізацій є періодичною $r_\xi(t,u) = r_\xi(t+T, u+T)$ (рис.7) та періодично-заникаючою (рис.8) як суцільної реалізації $R_\xi(u)$, що свідчить про періодичність сигналу та його скінченність $R_\xi(u) < \infty$.




$r_\xi(t,u) = r_\xi(t+T, u+T)$ - періодичність

Рис.7. Реалізації кореляційних функцій від ансамблю реалізацій ПС




$R_\xi(u) < \infty$ - скінченність

Рис. 8. Реалізація автокореляційної функції ПС

За результатами аналізу ПС встановлено, що його адекватна математична модель повинна враховувати у своїй структурі властивості випадковості (рис.5), зокрема нестаціонарності (рис.6), повторності (періодичності, циклічності) (рис.7), повинна належати до класу скінчених процесів (рис.8) та враховувати взаємозв'язки між різними хвилями (циклами) однієї і тієї ж його реалізації для дослідження динаміки зміни фазо-часової структури ПС (рис.4).

У термінах енергетичної теорії цим вимогам задовольняє модель у вигляді періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП), яка має засоби врахування як пов'язаності гармонічних складових, так і зміни ймовірнісних характеристик в часовій області.

ПС як періодично корельований випадковий процес (ПКВП) класу $\pi^T$ - це процес, кореляційна функція якого задовольняє умови періодичності $r_\xi(t+T,u+T)=r_\xi(t,u)$ (періодичність кореляційної функції ПС (рис.7)) та скінченності $\frac{1}{T}\int_0^T r(t,t)dt<\infty$ (заникання кореляційної функції як суцільної реалізації (рис.8)).

ПС як періодично корельований випадковий процес із властивостями періодичності та скінченності подано у вигляді адитивно-мультиплікативної суміші випадкової (стаціонарні компоненти) та періодичної складових:

$$\xi(t)=\sum_{k\in Z}\xi_k(t)e^{i\frac{2\pi k}{T}t},\ t\in\mathbf{R}, \tag{5}$$

де $\xi_k(t)$ - випадкова складова ПС у вигляді стаціонарних та стаціонарно-пов'язаних процесів (стаціонарні компоненти); $e^{i\frac{2\pi k}{T}t}$ - періодична (циклічна) складова ПС з періодом $T$; $k$ – номер стаціонарної компоненти.

Подання ПС у вигляді ПКВП (5) обґрунтовує застосовність до нього відомих методів статистичного аналізу (синфазного, компонентного) для обчислення статистичних оцінок їхніх ймовірнісних характеристик (інформативних ознак), які є показниками стану судин людини при виявленні ригідності судин.

**В розділі 3** наведено матеріал, присвячений питанням розробки макету фотоплетизмографічної системи та на базі обґрунтованої математичної моделі пульсового сигналу у вигляді ПКВП отримано нові вирази для числення його ймовірнісних характеристик як показників стану ригідності судин одержаних синфазним та компонентним методами аналізу.

Для реєстрації ПС в лабораторіях кафедри біотехнічних систем ТНТУ імені Івана Пулюя розроблено дослідний макет фотоплетизмографічної системи, структуру якого зображено на рис.9, яка складається з оптичного датчика положення 1, детектора пульсового сигналу 2, АЦП 3 та перетворювача UART-USB 4, ПК 5.

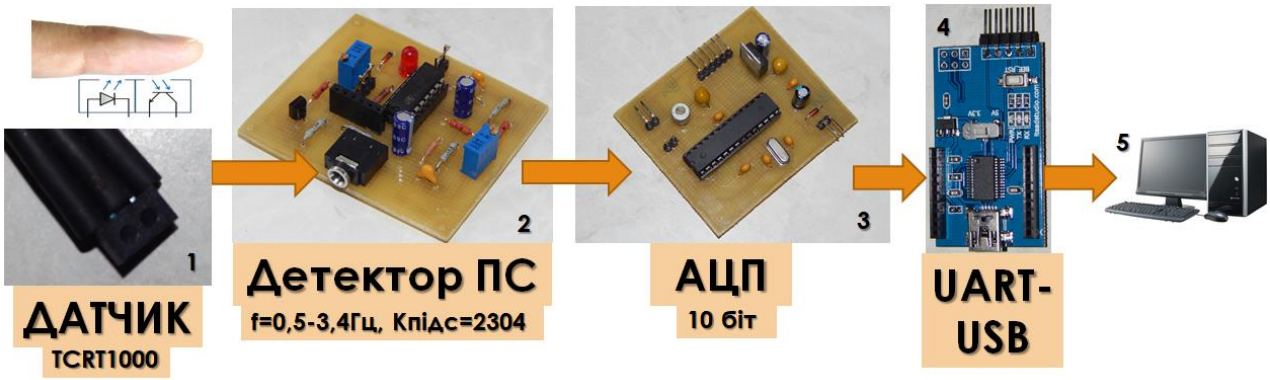



Рис.9. Структура схема макету фотоплетизмографічної системи

Реалізацію експериментально зареєстрованого ПС із використанням розробленого макету системи зображено на рис.10.

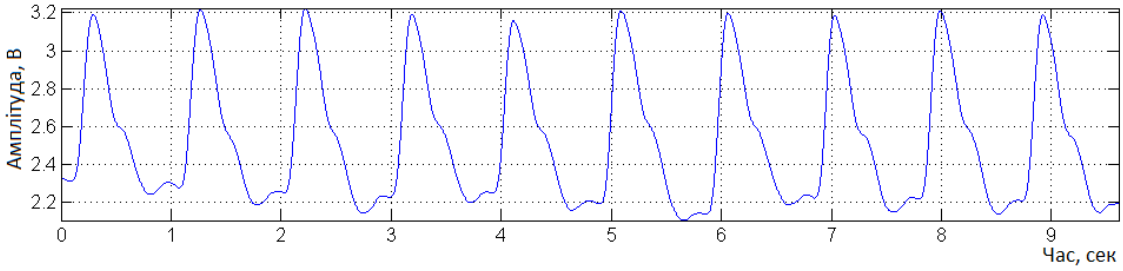



Рис. 10. Реалізація експериментально зареєстрованого ПС дослідним макетом

Для встановлення достовірності результатів роботи макету використано метрологічний показник згідно ДСТУ-НРМГ64:2006 у вигляді відтворюваності результатів вимірювання в одних і тих же умовах. За результатами метрологічної повірки встановлено, що результати роботи макету відтворює результати роботи існуючої системи Easy Pulse Sensor (США). Отже, результати роботи макету є достовірними.

В основі синфазного та компонентного методів аналізу емпіричних ПС $\xi(t)$ як ПКВП для оцінювання стану ригідності судин лежать процедури обчислення оцінок кореляційних компонент $\hat{B}_k(u)$, які кількісно відображають потужність фазо-часових відхилень ПС згідно виразів:

- синфазний аналіз:

$$\hat{B}_k(u) = \frac{1}{T}\int_0^T \hat{b}_\xi(t,u) e^{-ik\frac{2\pi}{T}t} dt, \quad k \in \mathbf{Z},\ u \in \mathbf{R} \tag{6}$$

де $T$ - період корельованості ПС як ПКВП; $u$ – часовий зсув;

$\hat{b}_\xi(t,u)$ - параметрична коваріація, характеризує часову мінливість ПС $\xi(t)$:

$$\hat{b}_\xi(t,u) = \frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K} \overset{0}{\xi}(t+u+kT)\overset{0}{\xi}(t+kT), \quad t \in [0,T),\ u \in \mathbf{R} \tag{7}$$

де $\overset{0}{\xi}(t) = \xi(t) - m_\xi(t)$ - центрований ПС; $m_\xi(t)$ - математичне сподівання ПС;

- компонентний аналіз:

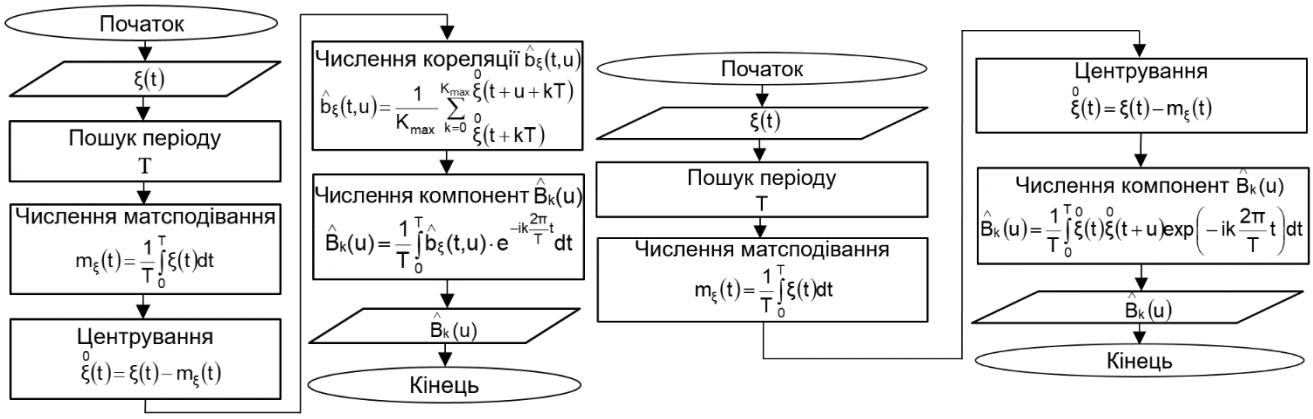
$$\hat{B}_k(u) = \frac{1}{T}\int_0^T \overset{0}{\xi}(t)\overset{0}{\xi}(t+u) e^{-ik\frac{2\pi}{T}t} dt, \quad k \in \mathbf{Z},\ u \in \mathbf{R} \tag{8}$$

Процедурою розрізнення станів судин людини (норма чи патологія) за кореляційними компонентами $\hat{B}_k(u)$ є критерій, який базується на усередненні кореляційних компонент ПС $\hat{B}_k(u)$ за зсувами $u$ згідно з виразу:

$$M_u\left\{\hat{B}_k(u)\right\} = \frac{1}{U_{\max}}\sum_{u=1}^{U_{\max}} \hat{B}_k(u), \quad u = \overline{1, U_{\max}},\ k = \overline{1, K_{\max}} \tag{9}$$

де $k$ – номер компоненти; $U_{\max}$ – максимальна довжина зсуву; $K_{\max}$ – максимальна кількість компонент.

Використовуючи вирази (6-8) розроблено блок-схеми синфазного та компонентного методів аналізу, які зображено на рис.11.




а) б)

Рис.11. Блок-схеми синфазного (а) та компонентного (б) аналізів ПС

Розроблені блок-схеми аналізу ПС (рис.11) дають змогу розробити програмне забезпечення, як складової одиниці фотоплетизмографічної системи для оцінювання характеристик ПС, з метою виявлення нових в області діагностики стану судин людини, зокрема їх ригідності, інформативних ознак на основі математичної моделі у вигляді ПКВП.

**В розділі 4** розроблено метод та алгоритм верифікації методів синфазного та компонентного аналізу пульсового сигналу як періодично корельованого випадкового процесу на базі імітаційного моделювання пульсового сигналу. Розроблено програмне забезпечення для імітування та аналізу пульсових сигналів.

Здійснено процедуру валідації методів аналізу пульсового сигналу шляхом використання критерій Фішера та результати аналізу імітованих і емпіричних сигналів.

На рис.12 зображено блок-схему верифікації та валідації методів аналізу ПС. В процесі верифікації перевіряється працездатність методів аналізу шляхом імітаційного моделювання ПС. При валідації перевіряється істинність працездатності методів аналізу шляхом порівняння результатів аналізу імітованих та емпіричних даних із використанням статистичних критеріїв.

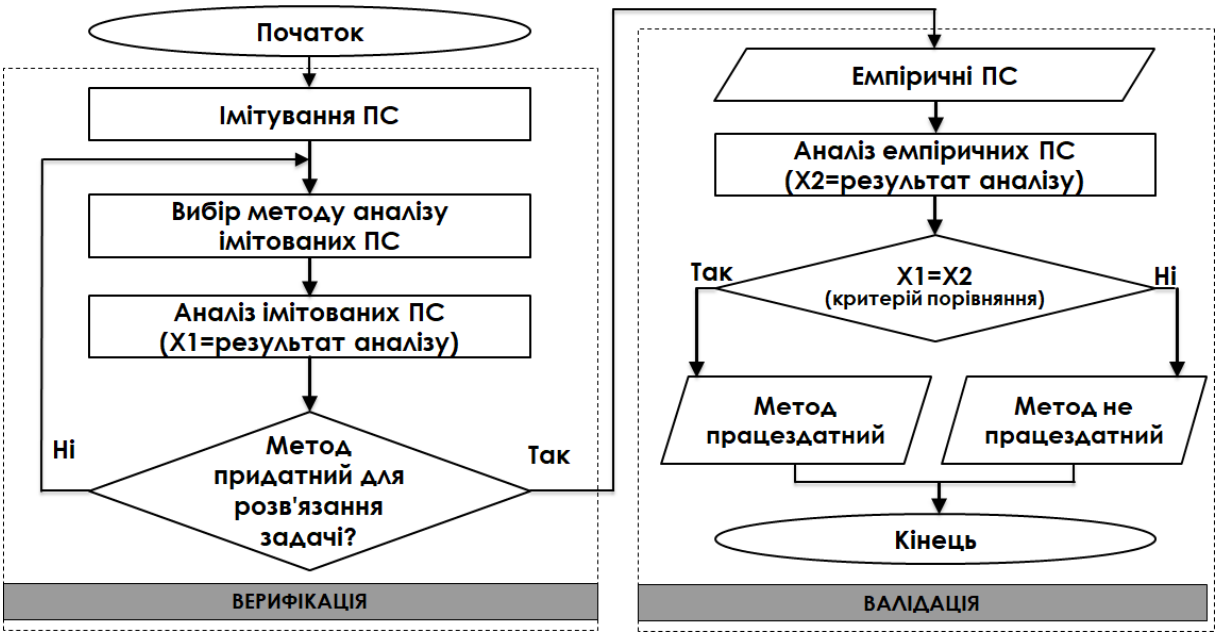



Рис.12. Блок-схема верифікації та валідації методів аналізу ПС як ПКВП

Імітаційну модель ПС для верифікації методів аналізу подано у вигляді періодично подовжених в часовому просторі сум двох часозміщених між собою функцій нормального (гаусового) розподілу із урахуванням періодичності, випадковості амплітудних та фазо-часових показників як результату зміни жорсткості (еластичності) судин при проявах ригідності судин у вигляді виразу:

$$\xi(t)=\sum_{k=1}^{N_k}\left(\begin{cases}\sum\limits_{n=1,N}(A_{nk}+\psi_{Ak})\cdot e^{-\frac{(t-(m_{nk}+\psi_{mk}))^2}{2(T_{nk}+\psi_{Tk})^2}}\cdot e^{-tK_{nk}} & ,t\in[T_{k-1},T_k)\\ 0 & ,t\notin[T_{k-1},T_k)\end{cases}\right)+n(t),\quad t\in\mathbf{R} \qquad (10)$$

де $T_k$ - ПС в межах $k$-го періоду; $A_{nk}$, $m_{nk}$, $T_{nk}$ - амплітуда, момент часу максимального кровонаповнення та тривалість $n$-ої хвилі ПС в межах $k$-го періоду; $\psi_{Ak}$, $\psi_{mk}$, $\psi_{Tk}$ - випадковість амплітуди $A_{nk}$, моменту часу $m_{nk}$ та тривалості $T_{nk}$ ПС в межах $k$-го періоду; $K_{nk}$ - коефіцієнт фазового відхилення $n$-ої хвилі ПС в межах $k$-го періоду; $N$ – кількість складових хвиль ПС; $N_k$ – кількість серцевих циклів кровонаповнення (періодів); $n(t)$ - адитивна випадкова складова ПС.

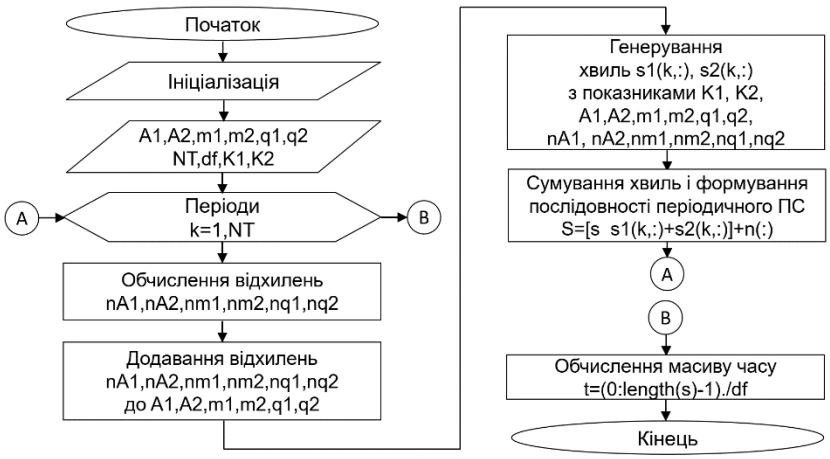



Рис.13. Блок-схема програми імітування ПС

Блок-схему програми імітування ПС зображено на рис.13.

На рис.14 наведено реалізації зімітованих ПС у середовищі MATLAB.

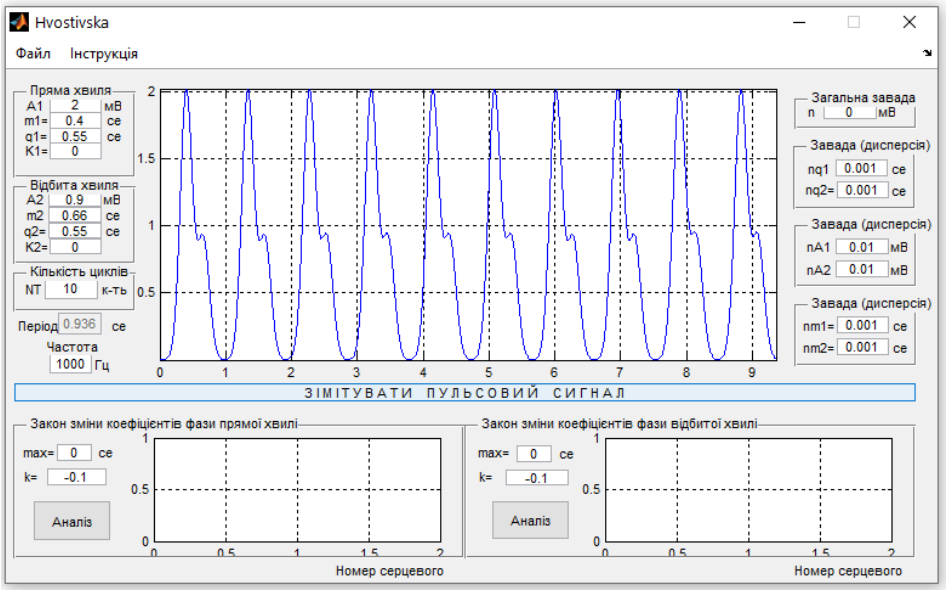
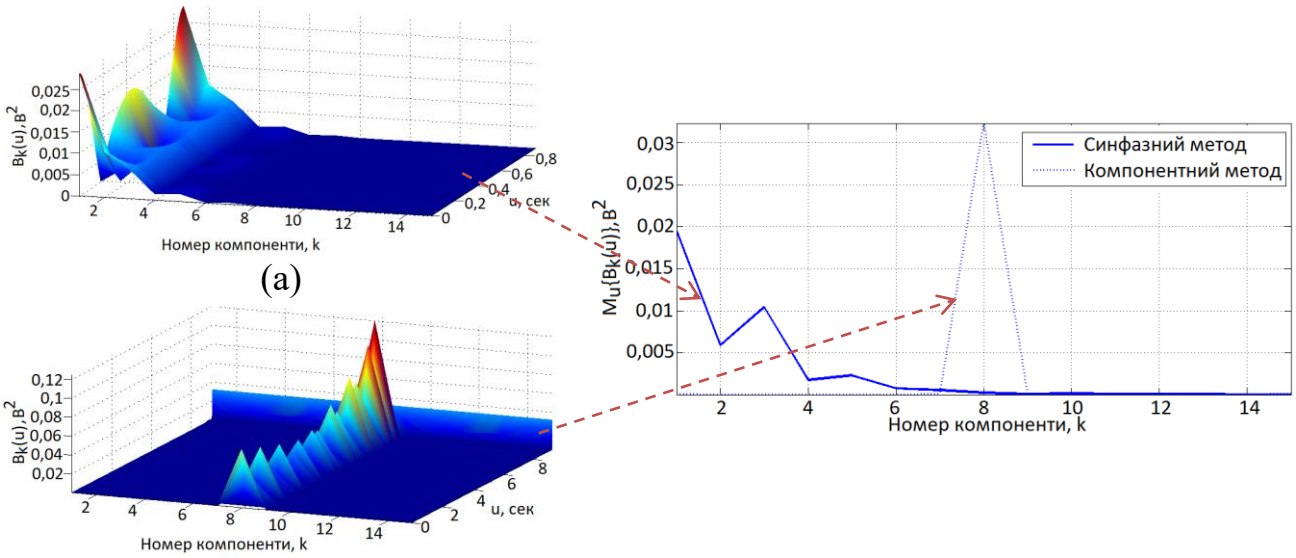



Рис.14. Реалізація зімітованого ПС (норма фізіологічної норми)

Результати синфазного та компонентного аналізу імітованих ПС (рис.14) зображено на рис.15 у вигляді реалізації усереднених кореляційних компонент.

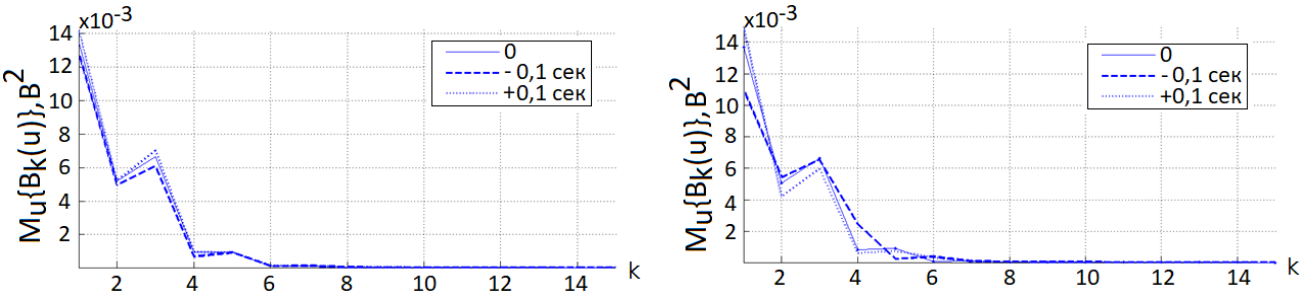



(а)

(б) в)

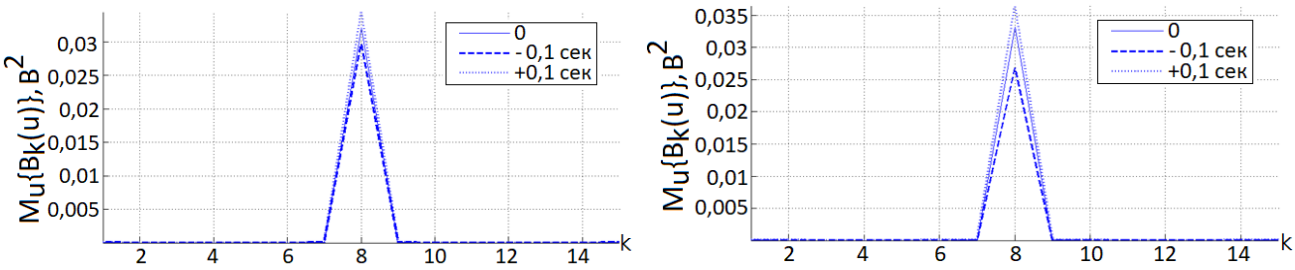
Рис.15. Реалізації усереднених оцінок (в) кореляційних компонент імітованого ПС обчислених синфазним (а) та компонентним (б) методами

Верифікацію методів аналізу здійснено шляхом зсуву фаз прямої $\varphi_{01}$ та відбитої $\varphi_{02}$ хвиль імітованого ПС відносно початкового значення фази. Результати верифікації синфазного аналізу зображено на рис.16, а компонентного – на рис.17.




а) б)

Рис. 16. Результати впливу зсуву прямої (а) та відбитої (б) хвилі на значення усереднених кореляційних компонент при синфазному аналізі ПС




а) б)

Рис. 17. Результати впливу зсуву прямої (а) та відбитої (б) хвилі на значення усереднених кореляційних компонент при компонентному аналізі ПС

За результатами дослідження встановлено, що при часовому зсуві прямої та відбитої хвиль в додатному напрямі ($\varphi01+\Delta\varphi$, $\varphi02+\Delta\varphi$) спостерігається додатній приріст значень усереднених кореляційних компонент ($M\{Bk(u)\}+\Delta B$), а при зсуві у від'ємному напрямі – від'ємний приріст компонент ($M\{Bk(u)\}-\Delta B$). Такий факт

вказує на працездатність методів аналізу ПС та інформативність усереднених кореляційних компонент при виявленні змін ригідності судин у людини.

В процесі валідації методів аналізу здійснено процедуру аналізу експериментального ПС з подальшим порівнянням результатів аналізу імітованих сигналів у відповідності до блок-схеми (рис.12). Результат аналізу емпіричного ПС (рис.10) у вигляді реалізації усереднених кореляційних компонент зображено на рис.18.

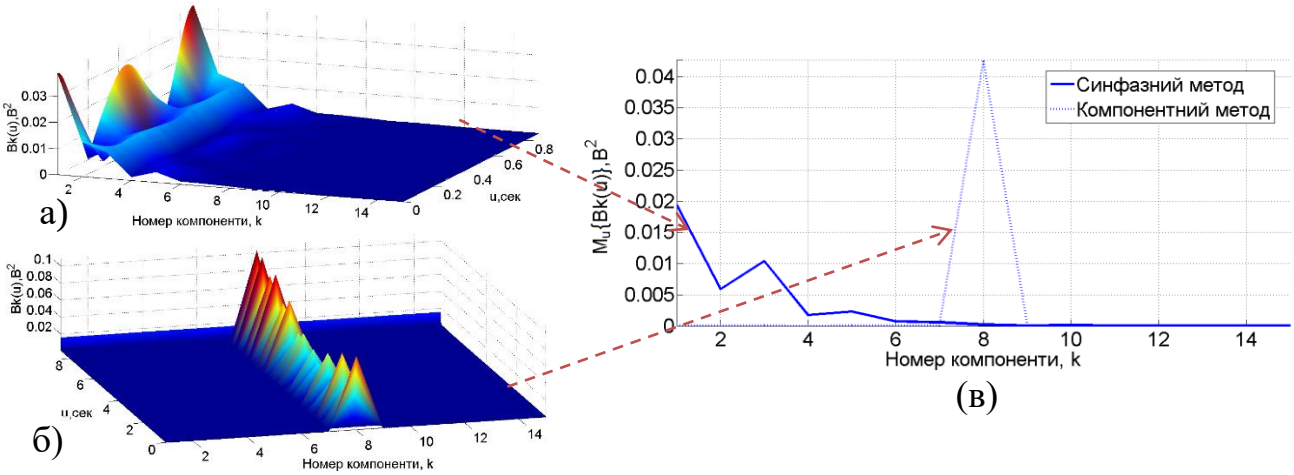



Рис.18. Реалізації усереднених оцінок (в) кореляційних компонент емпіричного ПС обчислених синфазним (а) та компонентним (б) методами

Для порівняння результатів аналізу ПС (рис.15, рис.18) в процесі валідації використано F-критерій (критерій Фішера), який базується на порівнянні дисперсій результатів синфазного та компонентного аналізу ПС:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} F_{крит}(k_1, k_1, p_f, p_d), \tag{11}$$

де $\sigma_1^2$ і $\sigma_2^2$ – дисперсії результатів аналізу ПС ($\sigma_1 > \sigma_2$):

$$\sigma_{1,2}^2 = \frac{1}{N_k - 1} \sum_{k=1}^{N_k} \left( M_u\{B_k(u)\} - \overline{M_u\{B_k(u)\}} \right)^2, \tag{12}$$

$F_{крит}(k_1, k_2, p_f, p_d)$ – табличне критичне значення, яке вибирається в залежності від ступенів вільності вибірки результатів аналізу $k_1, k_2$ та ймовірності помилки $p_f = 0{,}01$ та достовірності $p_d$ ($k_1 = n_1 - 1$; $k_2 = n_2 - 1$, де $n_1, n_2$ – довжини вибірки результатів аналізу ПС (кількість усереднених кореляційних компонент)).

Для прийняття рішення щодо подібності результатів висунуто дві гіпотези: $H_0$ – результати аналізу подібні; $H_1$ – результати не подібні. Згідно критерію (11) у разі не перевищення відношення дисперсій критичного значення $F_{крит}$ приймається нульова гіпотеза $H_0$, а в іншому випадку – гіпотеза $H_1$.

Результати обчислень, які наведено в табл. 1, вказують на подібність результатів аналізу імітованих та емпіричних сигналів ($F < F_{крит}$) (гіпотеза $H_0$) з достовірністю прийняття рішення 0,99 (0,95) та помилкою прийнятого рішення 0,01 (0,05).

*Таблиця 1*

**Результати порівняння усереднених оцінок кореляційних компонент ПС**

| Синфазний метод | Компонентний метод | $p_f$ | $p_d$ | $H_1/H_0$ |
|---|---|---|---|---|
| $(F=1{,}99)<(F_{крит}(14{,}14)=3{,}71)$ | $(F=1{,}63)<(F_{крит}(14{,}14)=3{,}71)$ | 0,01 | 0,99 | $H_0$ |
| $(F=1{,}99)<(F_{крит}(14{,}14)=2{,}49)$ | $(F=1{,}63)<(F_{крит}(14{,}14)=2{,}49)$ | 0,05 | 0,95 | $H_0$ |

Отже, методи аналізу ПС є істинно працездатними при виявленні ранніх змін у функціонуванні судин людини, зокрема їх ригідності, з достовірністю прийнятого рішення 0,99 (0,95) та ймовірністю помилки 0,01 (0,05).

У **додатках** наведено тексти програм, розроблені для ПК (ОС Windows 7,8,10), акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

## ВИСНОВКИ

У дисертації розв’язано актуальну наукову задачу обґрунтування математичної моделі та розроблення методів аналізу пульсового сигналу для підвищення інформативності фотоплетизмографічних систем.

1. Встановлено, на підставі результату аналізу відомих тенденцій розвитку математичних моделей пульсового сигналу, необхідність обґрунтування нової математичної моделі досліджуваного сигналу із урахування у її структурі динаміки зміни фазо-часових параметрів як чутливого показника стану ригідності судин, що є важливим для задач своєчасної діагностики та профілактики.

2. Обґрунтовано структуру математичної моделі пульсового сигналу у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, що уможливило врахувати кореляційну взаємопов’язаність між різними хвилями (циклами) однієї і тієї ж його реалізації для відстеження динаміки зміни фазо-часових параметрів, чим підвищено інформативність аналізу досліджуваного сигналу для задачі виявлення ригідності судин у людини.

3. Розроблено методи та алгоритми аналізу пульсового сигналу на основі обґрунтованої математичної моделі як періодично корельованого випадкового процесу та методів її оцінювання (синфазного і компонентного), що забезпечило підвищення інформативності фотоплетизмографічних систем шляхом отримання нових інформативних (діагностичних) ознак як чутливих індикаторів стану ригідності судин.

4. Розроблено метод та алгоритм верифікації методів аналізу пульсових сигналів на основі імітаційної моделі пульсового сигналу як періодично подовжених в часовому просторі сум двох часозміщених функцій нормального (гаусового) розподілу з врахуванням стохастичності амплітудних та фазо-часових показників, що уможливило підтвердити працездатність методів аналізу пульсових сигналів при виявленні варіативності параметрів ригідності судин.

5. Розроблено метод та алгоритм валідації методів аналізу пульсових сигналів на основі F-критерію (критерію Фішера), що уможливило обґрунтування вибору рішення про затвердження адекватності синфазного та компонентного результатів аналізу при розв’язанні задачі виявлення ригідності судин людини з достовірністю прийнятого рішення 0,95 (0,99) та ймовірністю помилки 0,05 (0,01).

6. Розроблено дослідний макет фотоплетизмографічної системи та програмне забезпечення для комп’ютерного моделювання пульсових сигналів та верифікації і валідації результатів його статистичного аналізу.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Праці, в яких опубліковано основні наукові результати

1. Драган Я., Никитюк В., Хвостівська Л. Математична модель фотоелектричного сигналу полімеризації стоматологічного матеріалу у вигляді імпульсного періодичного корельованого випадкового процесу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2013. № 771. С. 146-149.
***(індексується у Index Copernicus, Google Scholar)***

2. Хвостівська Л.В., Яворський Б.І. Математична модель пульсового сигналу для підвищення інформативності систем діагностики стану судин людини. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2015. Випуск 6 (95). С.29-34.
***(індексується у загальнодержавній базі даних «Україніка наукова» (реферативний журнал «Джерело») та міжнародних наукометричних базах даних «Ulrich’s Web Global Serials Directory», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services»).***

3. Хвостівський М.О., Хвостівська Л.В. Синтез структури інформаційної системи реєстрації та обробки пульсового сигналу. *Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка*. 2015. Т. 4. Вип. 1 С. 83-89. ISSN 2227-8842
***(індексується у «Google Scholar»).***

4. Хвостівська Л.В. Імітаційна модель пульсового сигналу судин людини. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2016. № 2. С.94-100.
***(індексується у Index Copernicus, Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography).***

5. Hvostivska L., Oksukhivska H., Hvostivskyy M., Shadrina H. Імітаційне моделювання добового пульсового сигналу для задачі верифікації алгоритмів роботи систем довготривалого моніторингу, *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (77)*. 2019. pp 66-73. doi: 10.20535/RADAP.2019.77.66-73.
***(індексується у Web of Science, DOAJ).***

6. Хвостівська Л.В., Осухівська Г.М., Хвостівський М.О., Шадріна Г.М., Дедів І.Ю. Розвиток методів та алгоритмів обчислення періоду стохастичних біомедичних сигналів для медичних комп’ютерно-діагностичних систем». *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, (79). С. 78-84. doi: 10.20535/RADAP.2019.79.78-84.
***(індексується у Web of Science, DOAJ)***.

**Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

7. Хвостівська Л.В., Хвостівський М.О., Яворська Є.Б. Математична модель пульсового сигналу для визначення гемодинамічних показників серцево-судинної системи людини. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції «*Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування*» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2013. С. 15-18.

8. Хвостівська Л.В., Яворський Б.І. Актуальність застосування синфазного та компонентного методів щодо аналізу пульсового сигналу судин людини. Матеріали XVII наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «*Природничі науки та інформаційні технології*» (20-21 листопада 2013 р.). Тернопіль, 2013. Т.1. С. 45.

9. Хвостівська Л.В., Хвостівський М.О., Яворська Є.Б. Синфазний метод аналізу пульсового сигналу судин людини. Міжнародна науково-практична конференція SWorld "*Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2013*". Технические науки. Одесса, 2013. Т. 5. С 66-68.

10. Хвостівська Л.В. Компонентний метод аналізу пульсового сигналу судин людини. 18-й Международный молодежный форум «*РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке*». Харків, 2014. Т.1. С 168.

11. Хвостівський М.О., Хвостівська Л.В. Синтез структури інформаційної системи реєстрації та обробки пульсового сигналу. Матеріали XVIII наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «*Природничі науки та інформаційні технології*»: зб. тез доповідей (29-30 жовтня 2014 р.). Тернопіль, 2014. С. 105-106.

12. Хвостівська Л.В. Аналіз математичних моделей пульсового сигналу. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «*Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій*» (19–21 травня 2015 р.). Тернопіль, 2015. С.158-159.

13. Хвостівська Л.В., Яворський Б.І. Комп'ютерне імітаційне моделювання пульсового сигналу. Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції "*Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування*" (9-10 червня 2015 р.). Тернопіль, 2015. С.107-110.

14. Хвостівська Л. Фазово-часова структура пульсової хвилі як показник стану ригідності судини людини. Матеріали XIX наукової конференції ТНТУ ім. Ів. Пулюя, (м.Тернопіль, 18-19 травня 2016 р.). Тернопіль, 2016. С. 126-127.

15. Хвостівська Л.В., Хвостівський М.О. Верифікація синфазного та компонентного методів аналізу пульсового сигналу. Матеріали XX наукової конференції ТНТУ ім. Ів. Пулюя (17-18 травня 2017 р.). Тернопіль, 2017 С. 137-138.

16. Хвостівська Л.В., Хвостівський М.О. Зміно-періодичний корельований випадковий процес. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування*. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції (8-9 червня 2017 р.). Тернопіль, 2017. С.129-130.

17. Хвостівська Л.В., Хвостівський М.О. Валідація методів аналізу пульсового сигналу як періодично корельованого випадкового процесу. Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „*Актуальні задачі сучасних технологій*“ (м. Тернопіль, 16-17 листопада 2017 р.). Тернопіль, 2017. Том 2. С.177-178.

18. Хвостівська Л.В., Хвостівський М.О., Якимець Б.В. Комп’ютерна система діагностики функціонального стану судин людини. Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „*Актуальні задачі сучасних технологій*“ (Тернопіль, 28–29 листоп. 2018.). Тернопіль : ТНТУ, 2018. Том 2. С.188-189.

19. Хвостівська Л.В., Хвостівський М.О., Осухівська Г.М. Метод визначення періоду пульсового сигналу. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «*Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій*». (20-21 червня 2019 р.). Тернопіль: 2019. С.153-154.

20. Хвостівська Л.В., Кравчук А., Хвостівський М.О. Комп’ютерний генератор тестових сигналів пульсової хвилі судин людини. II Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених та студентів «*Сучасні інформаційні системи та технології*» (30 листопада, 2019 р., м.Херсон). Херсон, 2019. С.106-107.

21. Хвостівський М.О., Хвостівська Л.В. Розвиток математичних моделей та методів аналізу пульсового сигналу для комп’ютерних систем діагностики стану судин людини. Міжнародна науково-практична конференція «*Інформаційні системи та технології в медицині*» (ІСМ–2019ІІ). Харків, 2019. С. 61-63.

## АНОТАЦІЯ

**Хвостівська Л.В. Математична модель та методи аналізу пульсового сигналу для підвищення інформативності фотоплетизмографічних систем.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021.

У дисертації розв’язано актуальну наукову задачу обґрунтування математичної моделі та розроблення методів аналізу пульсового сигналу для підвищення інформативності фотоплетизмографічних систем.

Обґрунтовано вибір математичної моделі пульсового сигналу у вигляді періодично корельованого випадкового процесу. На базі обґрунтованої моделі пульсового сигналу розроблено методи та алгоритми його аналізу для обчислення усереднених кореляційних компонент як інформативних ознак стану ригідності судин. Розроблено обчислювальний метод та алгоритм оцінювання періоду пульсового сигналу для підвищення точності його аналізу. Розроблено програмне забезпечення в середовищі MATLAB та макет фотоплетизмографічної системи для реєстрації та аналізу пульсового сигналу.

Розроблено метод та алгоритм верифікації та валідації методів аналізу пульсового сигналу на базі імітаційного моделювання та параметричного критерію

Фішера. На підставі результатів верифікації та валідації встановлено, що методи та розроблені на їх основі алгоритми аналізу пульсового сигналу є істинно працездатними при виявленні ригідності судин у людини.

*Ключові слова:* пульсовий сигнал, ригідність судин, інформативність, періодично корельований випадковий процес, синфазний та компонентний метод, кореляційні компоненти, верифікація, валідація, алгоритм, програмне забезпечення, фотоплетизмографічна система.

## АННОТАЦИЯ

**Хвостивская Л.В. Математическая модель и методы анализа пульсового сигнала для повышения информативности фотоплетизмографических систем. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 - Математическое моделирование и вычислительные методы. - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2021.

В диссертации решена актуальная научная задача обоснования математической модели и разработка методов анализа пульсового сигнала для повышения информативности фотоплетизмографических систем.

Обоснован выбор математической модели пульсового сигнала в виде периодически коррелированного случайного процесса. На базе обоснованной модели пульсового сигнала разработаны методы и алгоритмы его анализа для вычисления усредненных корреляционных компонент как информативных признаков состояния ригидности сосудов. Разработан вычислительный метод и алгоритм оценки периода пульсового сигнала для повышения точности его анализа. Разработано программное обеспечение в среде MATLAB и макет фотоплетизмографичной системы для регистрации и анализа пульсового сигнала.

Разработан метод и алгоритм верификации и валидации методов анализа пульсового сигнала на базе имитационного моделирования и параметрического критерия Фишера. На основании результатов верификации и валидации установлено, что методы и разработанные на их основе алгоритмы анализа пульсового сигнала являются истинно работоспособными при выявлении ригидности сосудов у человека.

*Ключевые слова*: пульсовой сигнал, ригидность сосудов, информативность, периодически коррелированный случайный процесс, синфазный и компонентный метод, корреляционные компоненты, верификация, валидация, алгоритм, программное обеспечение, фотоплетизмографическая система.

## SUMMARY

**Khvostivska L. Mathematical model and methods of pulse signal analysis to increase the informativeness of photoplethysmographic systems. - The manuscript.**

Thesis for Candidate Degree of Technical Science on specialty 01.05.02 – Mathematical modelling and computation methods. – Ternopil Ivan Puluj National technical University, Ternopil, 2021.

In the dissertation the actual scientific problem of a pulse signal mathematical model substantiation and development methods of its analysis of photoplethysmographic systems informativeness increasing is solved.

The mathematical model of the pulse signal in the form of a periodically correlated random process is substantiated, which made it possible to take into account randomness, periodicity and correlation between different pulse waves (cycles) of one implementation to solve the problem of studying the dynamics of changes in the phase-time parameters of the signal as a sensitive indicator of the state of vascular rigidity. A computational method and algorithm for estimating the pulse signal period based on finding the minimum of the centered signal mean value variation function have been developed to increase the accuracy of its analysis by reducing the blurring of the calculated estimates of informative features in photoplethysmographic systems.

A model of photoplethysmographic system for registration and analysis of pulse signal is developed. The results of metrological verification confirmed the authenticity of the layout. On the basis of a pulse signal substantiated model methods and algorithms of its analysis for calculation of averaged correlation components as informative (diagnostic) signs of a condition of human vessels rigidity are developed. The computational complexity of pulse signal analysis algorithms in relation to their software implementation is estimated. Specialized software as a component of photoplethysmographic systems for a pulse signal computer analysis by in-phase and component methods in MATLAB environment has been developed.

A method and algorithm for analysis methods verification based on simulation of a pulse signal as periodically extended in time space sums of two time-shifted functions of normal distribution taking into account randomness of amplitude and phase-time indicators were developed. A software with a graphical user interface in the MATLAB environment to simulate high-probability implementations of test pulse signals by input parameters (wave amplitude, their time durations and moments, number of cycles, randomness, phase changes, etc.) was developed. According to the verification results using a pulse signal simulation model the interrelation between phase shifts of direct and reflected pulse waves in the structure of simulated signals with averaged correlation components as informative features is revealed which confirmed the fact of their informativeness and truth about the efficiency of the methods of analysis of the pulse signal at detection of the human vessels rigidity manifestations.

The validation procedure to establish the truth of the efficiency of the pulse signal in-phase and component analysis methods and algorithms by comparing the analysis results of the simulated pulse signals with experimental data is carried out. Based on Fisher's parametric criterion, the similarity of the analysis results (averaged correlation components) of the simulated and experimental pulse signal with the reliability of the decision 0.95 (0.99) and the error of the decision 0.05 (0.01), was confirmed.

*Key words*: pulse signal, vascular rigidity, informativeness, periodically correlated random process, synphase and component method, correlation components, verification, validation, algorithm, software, photoplethysmographic system.

Підписано до друку 18.03.2021. Формат 60×90, 1/16.
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.
Умовно–друк. арк. 0,9. Наклад – 100 прим.
Замовлення № 18032021

*****

Друк ФОП Паляниця В. А.
Свідоцтво ДК №4870 від 20.03.2015 р.
м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 9а, оф.38.
тел. (0352) 528–777.