

*Розробка інформаційних технічних систем медичного призначення дає змогу інтенсифікувати процедуру діагностики, прогнозувати та аутентифікувати стан людини, створює можливість проведення комп'ютерних модельних та імітаційних експериментів. Розглянуто основні критерії класифікації пульсограм із встановленням причин їх обмеженої дієвості для аналізу тривалих часових послідовностей*

*Ключові слова: інформаційна система, критерії аналізу, пульсовий сигнал, пульс, фазова площина, фазовий портрет*

*Разработка информационных технических систем медицинского назначения позволяет интенсифицировать процедуру диагностики, прогнозировать и аутентифицировать состояние человека, создает возможность проведения компьютерных модельных и имитационных экспериментов. Рассмотрены основные критерии классификации пульсограм с установлением причин их ограниченный в использовании для анализа длительных временных последовательностей*

*Ключевые слова: информационная система, критерии анализа, пульсовое сигнал, пульс, фазовая плоскость, фазовый портрет*

УДК 612.16

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51219

# РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ПУЛЬСОВИХ СИГНАЛІВ

Т. М. Нікітчук

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра радіотехніки,  
радіоелектронних апаратів та  
телекомунікацій  
Житомирський державний  
технологічний університет  
вул. Черняхівського, 103,  
м. Житомир, Україна, 10003  
E-mail: tnitchuk@mail.ru

## 1. Вступ

Інформаційні системи та технології на даний час бурхливо розвиваються та впроваджуються у всі сфери діяльності людини, що, без сумніву, сприяє підвищенню рівня її життя. Людина створює різноманітні біотехнічні системи, які складаються безпосередньо із її організму та технічних засобів життєзабезпечення. Розробка інформаційних технічних систем медичного призначення дає змогу інтенсифікувати процедуру діагностики, прогнозувати та аутентифікувати стан людини, створює можливість проведення комп'ютерних модельних та імітаційних експериментів. Еволюція таких біотехнічних систем (БТС) говорить про те, що серед трьох її основних складових – пацієнт, лікар та технічні засоби – найбільш змінюються саме останні. Це призвело до більшого різноманіття спеціалізованих блоків та засобів, ускладнило їх використання лікарем та обслуговуючим технічним персоналом. Ефективність використання технічних засобів з метою проведення автоматизації діагностики можливо підвищувати завдяки перетворенню комплексу медико-біологічних показників в комплекс критеріїв аналізу на основі їх порівняння з нормативними (критеріальними).

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Останнім часом істотно зріс інтерес до розвитку інформаційних систем аналізу пульсацій та діагностики серцево-судинної системи (ССС). Розглядають методи електрокардіографії і різновиди пульсометрії (сфігмографія, плетизмографія), які є найбільш поширеними методами діагностики стану СССР, а через неї – і інших

органів і систем організму, слід зазначити наступне. Дані електрокардіограми надають важливі відомості для лікаря у разі необхідності встановлення діагнозу і призначення лікування хворому. Вони дозволяють визначати структурні і функціональні зміни в серці, однак не завжди можуть дати відповідь на багато діагностичних питань, що стоять перед лікарем щодо стану СССР загалом. Натомість пульсограма, окрім роботи серця, характеризує кровоплин, на якому відображається в певній мірі функціональний стан СССР і організму в цілому [1, 2]. У пульсовому сигналі променевої артерії знаходять своє віддзеркалення і процеси вищих рівнів регуляції, і багато гемодинамічних показників СССР, зокрема внутрішньо-судинний тиск, напруга артеріальної стінки, хвильові процеси в артеріальній системі, переміщення мас крові, її в'язкість, інтерференція хвиль в судинах і т. д. [2, 3]. Всі ці процеси в тому чи іншому ступені впливають на форму пульсової хвилі та її ритмічну структуру. Зміна ритмів, що виходять за межі норми, пов'язана з хворобою [3].

Обробка та аналіз пульсових коливань пройшли шлях від визначення частоти скорочень серця (ЧСС), використання усереднених часових та амплітудних показників до контурного аналізу зареєстрованих коливань. Інформація про пульсову хвилю накопичувалась лікарями протягом всього періоду існування пульсової діагностики, а розвиток комп'ютерних наук дозволяє сьогодні реалізувати обробку пульсового сигналу багатьма доступними методами з використанням широкого спектру технічних засобів. Методи цифрового оброблення пульсограм направлені на комп'ютерну фільтрацію і виділення корисної сигналу (слайн-апроксимація, Фур'є-аналіз, різні види вейвлет-перетворення та на визначення змін діагностичних параметрів. Найчастіше аналіз реалізують в

часовій області, оскільки такий спосіб представлення сигналу зрозумілий медичному працівнику

Аналіз діагностичної значимості часових параметрів пульсового сигналу променевої артерії за традицією тибетської медицини доводиться у роботі [4]. Встановлено, що функціональні відхилення в сторону «жару» чи «холоду» супроводжуються зміною частоти серцевих скорочень. Але, щоб оцінити такі відхилення, потрібно володіти високими вміннями по пальпації пульсу і знаннями по відповідності між значеннями ЧСС і можливим станом ССС.

У роботі [5] методику апаратної пульсової діагностики сформулювали, дослідивши пульсограми здорових людей, що знаходяться в стані психологічного, емоційного і фізіологічного спокою. Визначення пульсу проводять за нормативною пульсограмою, тобто порівнюють параметри отриманої пульсограми з діагностичними пульсографічними признаками, які встановлені раніше. Оцінка контурів пульсограм здійснюється за одиничними періодами коливань і не завжди кваліфікованими, досвідченими в даній діагностиці працівниками. У результаті контурного аналізу пульсові криві відображають лише загальну форму коливань тиску крові, і не забезпечують якісної та кількісної характеристики стану ССС.

На основі аналізу основних характеристик пульсограми променевої артерії, включаючи аналіз форми і ритмічної структури пульсового сигналу, розроблено макет комп'ютерної системи медико-фізіологічної діагностики станів організму [6]. Амплітудно-часовий аналіз пульсограм дозволяє виявляти зміни амплітуди, фази, геометрії контуру пульсової хвилі і співставляти їх з відповідними патологічними станами ССС людини. Знову ж таки, контурний аналіз пульсограм відображає лише загальну форму коливань тиску крові, і не забезпечує якісної та кількісної характеристики стану ССС.

Амплітудна і фазова пульсова спектрометрія в завданнях визначення функціонального стану людини розглядається у роботі [7]. Але методики є досить складними як в розумінні, так і в обчисленнях, оскільки потребують завчасної обробки пульсових сигналів з судин, складного розкладу на спектри, швидкодії математичних розрахунків та програм. Висока достовірність методів у цьому випадку [8, 9] досягається індивідуальним підходом до кожного окремого спектру, що унеможливує автоматизацію такої процедури

В Україні ведуться розробки систем пульсометрії здебільшого на основі зазначених методів оброблення та аналізу пульсових сигналів, обмеження у використанні яких зазначено вище. Це комп'ютеризовані системи пульсометрії [7, 10], у яких застосовуються амплітудно-часові і спектральні методи аналізу пульсових хвиль для визначення стану пацієнта. Дослідження проводяться по розробці багатосигнальної системи пульсометрії [11], в основу якого авторами покладено сфінгографічний метод реєстрації пульсограм. Метод заснований на аналізі графічного зображення кривих тиску в судинах ССС і використовується при діагностиці аортальних вад, для оцінювання серцевої хронометрії та швидкості пульсової хвилі. Однак сфінгографічні пристрої мають суттєві обмеження і не в повній мірі задовольняють потребам практичної медицини. Це викликано низькою оперативністю досліджень,

обмеженістю каналів реєстрації сигналів; в сучасних системах реєстрації сфінгографічних сигналів використовуються чутливі твердотільні сенсори тиску з еластичною мембраною, п'єзоелектричні та пневматичні датчики, у застосуванні яких суттєвим недоліком є значний вплив артефактів механічного походження.

Серед закордонних наукових шкіл, котрі протягом тривалого часу мають стабільний інтерес до проблем і задач пульсометрії, варто згадати такі. У Російській Федерації відома група авторів, які займаються розробкою систем діагностики за канонами тибетської медицини з реєстрацією пульсових сигналів в акупунктурних точках на зап'ясті [4, 12]. Однак, у роботах недостатньо вивчені критерії оцінювання ефективності діагностичних показників та окремих ознак з точки зору зменшення ризику помилкової діагностики.

Латвійська група [13] розробила інтегровану в ноутбук портативну систему пульсометрії. Основне застосування – синхронна реєстрація пульсових хвиль двома і більше каналами, амплітудно-часовий (контурний) аналіз та визначення часу поширення пульсової хвилі.

Недоліком сучасних систем пульсометрії є складність та висока вартість, сенсори в таких системах є винятково аналоговими, перед підсиленням аналоговий сигнал малого рівня передається по екранованому кабелю довжиною, що є достатнім для наведення кондуктивних завад з зменшення точності реєстрації первинного біосигналу; з метою обробки та дослідження сигналів використовують амплітудний, спектральний та контурний аналіз, недоліки яких зазначалися вище; недостатні точність, достовірність та інформативність пульсодіагностики; наявність ряду суперечностей та неузгодженостей в інтерпретації опрацьованих пульсограм та своєчасності проведення діагностики; аналіз людиною-експертом часто зумовлений помилками, що виникають внаслідок втоми, розсіяння уваги, відмінності у досвіді різних експертів тощо.

Оскільки пульсограми забезпечують інформацію про стан гемодинаміки і мають особливу діагностичну цінність у сукупності з іншими кардіосигналами (ЕКГ, ФКГ, статичні показники артеріального тиску), при їх аналізі необхідно використовувати не тільки спеціальні вузьконаправлені методики, але і загальні фізико-математичні методи. Саме таким методом є метод фазової площини [14, 15] – графоаналітичний метод дослідження динамічних систем.

---

### 3. Ціль та задачі дослідження

---

Проведені дослідження по розробці інформаційної системи аналізу пульсових сигналів ставили за мету отримати критерії діагностичних ознак пульсових сигналів на тривалих часових проміжках.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- зазначити причини обмеженої дієвості основних критеріїв пульсограм для аналізу тривалих часових послідовностей,
- визначити комплекс критеріїв для аналізу пульсових сигналів, використовуючи метод фазової площини;
- обґрунтувати структуру, алгоритм роботи інформаційної системи аналізу пульсограм.

#### 4. Методи оброблення, аналізу та визначення типу пульсацій для створення інформаційної системи аналізу пульсових сигналів

У роботі застосовано методи математичного моделювання для створення модельних пульсових кривих для основних типів пульсограм, представлених в системі класифікації, що ґрунтується на варіабельності характеристик пульсограм протягом усієї діагностичної процедури; методи теорії динамічних систем для побудови фазових портретів пульсових сигналів; методи статистичної обробки результатів модельного експерименту для узагальнення і описання створеного методу; методи програмної інженерії для реалізації програмної частини експериментального зразка інформаційної системи.

#### 5. Результати створення інформаційної системи аналізу пульсових сигналів

Структуру інформаційної системи медичного призначення можна зобразити наступним чином: пацієнт – технічні засоби аналізу та діагностики – експертна система – лікарський контроль – пацієнт (рис. 1).

Серед технічних засобів пульсової діагностики особливо актуальним є автоматизація медичного висновку. Ефективність таких інформаційних систем базується на чіткій та коректній класифікації типів пульсограм, що покладена в роботу автоматизованої системи.

Аналіз сучасних методів та засобів дозволив встановити, що класифікація за характеристиками одичної пульсової хвилі та класифікація на інтервалі 3–5 періодів є недостатньо інформативними, оскільки не враховують варіабельність показників серцево-судинної системи, виражених у коливаннях характеристик пульсограм на тривалому інтервалі, що відповідає процедурі реєстрації пульсових хвиль протягом 3–5 хв.

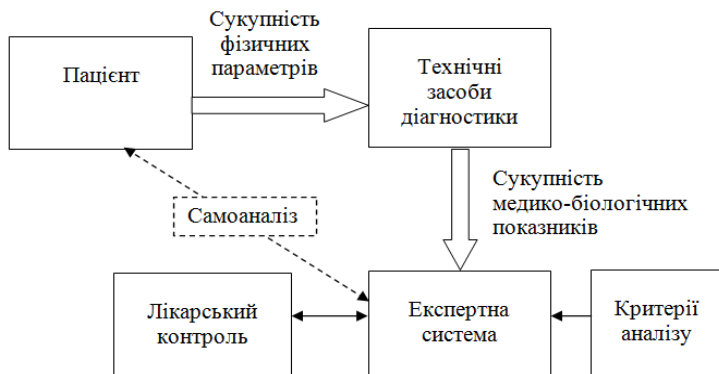


Рис. 1. Структура інформаційної системи діагностичного призначення

Тому пропонується класифікація (рис. 2), що базується на варіабельності характеристик пульсограм протягом усієї діагностичної процедури.

З метою вивчення динаміки ССС та отримання комплексу діагностичних критеріїв аналізу пульсових хвиль на тривалих часових проміжках рекомендується використовувати методи та прийоми фрактального аналізу як такі, що дозволяють виявляти самоподібність та регулярність часових послідовностей. Зокрема, для кількісного описання пульсограм на тривалому часовому інтервалі можливо використати метод фазової площини. Ефективність даного методу, перш за все, в тому, що при різних змінах в ритмі серця, при дисфункціях ССС змінюється не тільки послідовність періодів, але і швидкість їх зміни в часі. Тому диференційований пульсовий сигнал неминуче містить в собі додаткову інформацію про стан серцево-судинної системи досліджуваного. Фазовий портрет (ФП) можна утворити, відклавши по одній осі сам сигнал  $p(t) = x(t)$ , а по іншій – його похідну  $\dot{x}(t)$  (рис. 3).

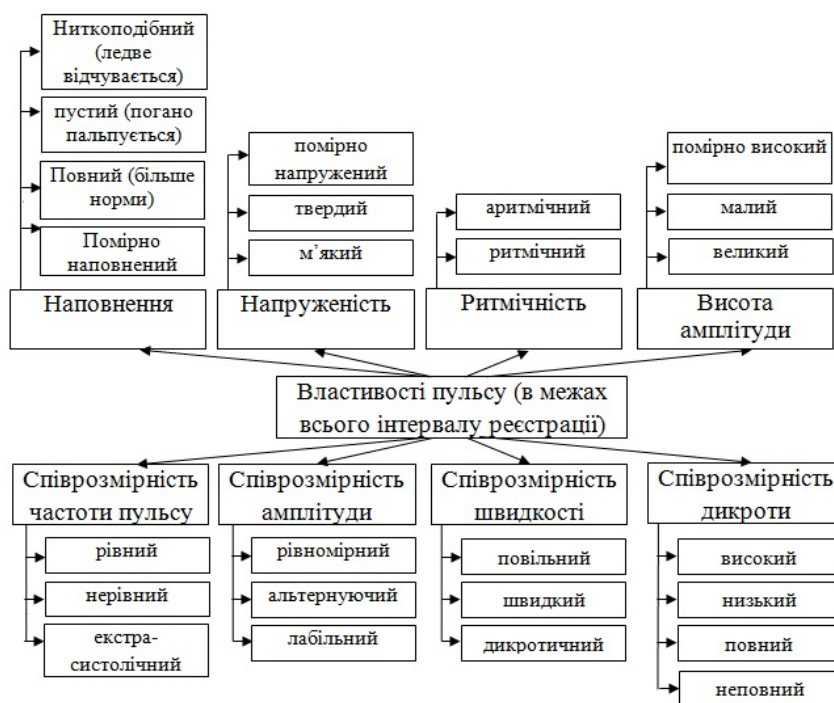


Рис. 2. Класифікація типів пульсу, що базується на варіабельності характеристик пульсограм протягом всієї діагностичної процедури

З метою кількісної оцінки отриманих траєкторій пульсових сигналів у фазовій площині, можливо використати наступні показники:

- площа фазового портрета  $S$  – число зайнятих комірок на площині;
- ступінь хаотизації  $Sh$ ;
- фрактальна розмірність (найбільша довжина фазового портрету)  $D$ .

Запропоновані критерії були застосовані для найбільш поширених типів пульсу, наведених в класифікації на рис. 2: «рівний», «нерівний», «повільний», «швидкий», «високий», «низький». Чисельні показники для наведених типів пульсограм проілюстровані в табл. 1.

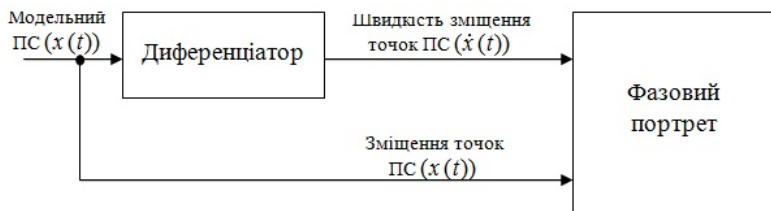


Рис. 3. Принцип утворення фазового портрета модельного пульсового сигналу

Дана таблиця містить абсолютні значення показників характеристик ФП пульсограм та відносні значення щодо типу пульсу «рівний», який прийнято за норму (сигнал без патологічних проявів). Порогове значення достовірності відносного показника фрактальності прийнято в межах 100 %. Таким чином, значущими виявились такі відхилення різних типів пульсограм відносно норми:

- «нерівний» пульс характеризується збільшенням ступеня хаотизації +ΔSh;
- «повільний» пульс – збільшенням ступеня хаотизації +ΔSh, зменшенням діаметру -ΔD;
- «швидкий» пульс – збільшенням ступеня хаотизації +ΔSh та діаметру +ΔD;
- «високий» характеризується зменшенням ступеня хаотизації -ΔSh та збільшенням діаметру +ΔD;
- «низький» пульс – збільшенням ступеня хаотизації +ΔSh та площі +ΔS, зменшенням -ΔD.

Аби сформувати комплекс критеріїв аналізу з певними числовими інтервалами, розглянуто розподілення числових значень характеристик фазових портретів пульсограм в координатних площинах. В літературних джерелах наведено діапазон зміни показників пульсової хвилі, що дало змогу отримати набори модельних кривих для кожного типу пульсу, представити їх у фазовій площині та обчислити показники фазових портретів.

За допомогою методів математичної статистики визначено діапазон (min та max) кожного критерію, обчислено середні значення показників ФП пульсограм та відхилень від середніх значень. Скориставшись дисперсійним аналізом проведено оцінювання вибірок модельних даних, форми розподілень та визначено ексцеси. Аналіз вибірок показав, що за критерії аналізу пульсограм на основі фазових портретів може бути обрано наступні показники характеристик ФПП: ступінь хаотизації Sh, площа S та фрактальна розмірність D як найбільший діаметр фазового портрету.

Тобто, тип пульсу можливо визначити за комплексом критеріїв аналізу як

$$y_j = \left\{ \begin{matrix} A_{Sh}, & A_{minSh} \leq A_{Sh} \leq A_{maxSh} \\ A_S, & A_{minS} \leq A_S \leq A_{maxS} \\ A_D, & A_{minD} \leq A_D \leq A_{maxD} \end{matrix} \right\}, \quad (1)$$

де  $y_j$  – висновок у системи щодо типу пульсу  $j, j=1, n, n=6$ .

Тоді, структурну схему алгоритму аналізу пульсограм з автоматизованим висновком згідно (1) можна зобразити рис. 4.



Рис. 4. Схема алгоритму аналізу пульсограм з автоматизованим висновком

Таблиця 1

Результати дослідження модельних пульсограм за показниками характеристик фазових портретів

Типи пульсу	Показники			$\Delta Sh / Sh_{рів}$ , %	$\Delta S / S_{рів}$ , %	$\Delta D / D_{рів}$ , %
	Ступінь хаотизації, Sh	Площа фазового портрету S, од <sup>2</sup>	Фрактальна розмірність D, од			
Рівний	0,6002	666290	36,5302	0	0	0
Нерівний	2,5924	701640	36,1376	+332	+5	-1
Повільний	1,0931	727900	32,9156	+82	+9	-10
Швидкий	1,5937	657740	45,5758	+16,6	-1	+25
Високий	0,4924	711170	50,8056	-18	+7	+39
Низький	0,8790	783990	25,4254	+47	+17	-30

### 6. Обговорення результатів розроблення інформаційної системи аналізу пульсових сигналів

З метою визначення поточного функціонального стану ССС та моніторингу пульсової хвилі останній час використовується багато методів обробки пульсових сигналів, а саме спектральний аналіз пульсового сигналу і контурно-часова методика, що використовують Фур'є-перетворення та вейвлет-аналіз, для яких необхідні складні математичні розрахунки, використання непростих програмних ресурсів. Об'ємно-



фазові параметри гемодинаміки є найбільш інформативними характеристиками функціонування системи кровообігу, оскільки в них відображається спільна робота серця та судин. Знаючи відношення величин об'ємно-фазових параметрів гемодинаміки і пов'язуючи їх з анатомічним і функціональним станом серця і судин в кожній фазі, можна з високою достовірністю говорити про патологічні процеси та їх корекцію. Ще Н. А. Амосов та його колеги вказували на можливість дослідження скорочувальної функції міокарда у фазовому просторі, координатами якого є амплітуда та швидкість зміни амплітуди. Діагностична цінність таких досліджень обумовлена тим, що при різних ураженнях ССС змінюється не тільки сам сигнал, а і його похідні по часу.

## 7. Висновки

Таким чином, запропонована класифікація пульсограм має ряд переваг, оскільки додатково враховує

варіабельність показників серцево-судинної системи на тривалому часовому інтервалі.

Визначено комплекс критеріїв для аналізу пульсових сигналів, а саме ступінь хаотизації  $Sh$ , площа  $S$  та фрактальна розмірність  $D$  як найбільший діаметр фазового портрету. Вибрані в якості діагностичних критерії показники фазових портретів пульсових сигналів підтвердили коректність розробленої класифікації для найбільш поширених типів пульсу.

Обґрунтовано структуру та алгоритм роботи інформаційної системи аналізу пульсограм на основі показників їх фазових портретів, які доцільно використовувати для дослідження пульсових коливань на тривалому часовому інтервалі. З метою підтвердження відмінності показників характеристик фазових портретів для різних типів пульсограм та можливості визначення дисфункції ССС за допомогою запропонованої інформаційної системи, яка дозволяє приймати, візуалізувати, обробляти, архівувати вихідні сигнали і результати обробки, необхідно провести аналіз модельних даних в умовах шумів та завад і застосувати критерії аналізу на дійсних даних.

## Література

1. Цыдыпов, Ч. Ц. Пульсовая диагностика тибетской медицины [Текст] / Ч. Ц. Цыдыпов. – Новосибирск: Наука, 1988. – 133 с.
2. Куршаков, Н. А. Кровообращение в норме и патологии [Текст] / Н. А. Куршаков, Л. И. Прессман. – М.: Медтехника, 1969. – 336 с.
3. Доброва, В. Є. Біофізика та медична апаратура: навчальний посібник [Текст] / В. Є. Доброва – К.: ВД «Професіонал», 2006. – 200 с.
4. Аюшеева, Л. В. Временные параметры пульсовой волны при диагностике заболеваний человека по традиции тибетской медицины [Текст] / Л. В. Аюшеева, В. В. Бороноев, И. В. Лебединцева, И. П. Леднева // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2009. – № 3 – С. 17–23.
5. Забирник, А. В. Аппаратная пульсовая диагностика: Теория и практика [Текст] / А. В. Забирник, А. Ю. Култаев. – Х.: Новое слово, 2008. – 116 с.
6. Дорофеюк, А. А. Измерение, преобразование и обработка пульсового сигнала лучевой артерии в медицинской диагностике [Текст] / А. А. Дорофеюк, А. А. Десова, В. В. Гучук // Мир измерений. – 2009. – № 1. – С. 4–14.
7. Шарпан, О. Б. Амплітуда і фазова пульсова спектрометрія в завданнях визначення функціонального стану людини [Текст]: матер. міжнар. наук.-техн. конф. / О. Б. Шарпан // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта. – Київ, 2012. – С. 80–81.
8. Шарпан, О. Б. Влияние частотных характеристик сосудистой системы на амплитудный и фазовый спектры пульсовых сигналов [Текст] / О. Б. Шарпан // Электроника и связь. – 2002. – № 14. – С. 83–87.
9. Chun, T. I. Spectrum analysis of Human Pulse [Text] / T. I. Chun, G. W. Ling // IEEE Transaction on Biomedical Engineering. – 1983. – Vol. 6 – P. 348–352. doi: 10.1109/tbme.1983.325136
10. Шарпан, О. Б. Програмно-вимірювальна фотоплетизмографічна система пульсової спектрометрії [Текст] / О. Б. Шарпан, О. В. Гусева, Н. І. Магльована, О. І. Рибін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 5. – С. 34–40.
11. Сторчун, Ю. Є. Моделювання елементів біотехнічної системи багатоканальної пульсометрії та розроблення пристрою формування пульсових сигналів [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. / Ю. Є. Сторчун. – Л., 2004. – 21 с
12. Бороноев, В. В. Вариабельность амплитудно-временных характеристик пульсовой волны [Текст] / В. В. Бороноев, О. С. Ринчинов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2006. – № 11. – С. 37–43.
13. Валтерис, А. Д. Сфигмография как метод оценки изменения гемодинамики под влиянием физической нагрузки: монография [Текст] / А. Д. Валтерис, Я. А. Яуя. – Рига: Зинатне, 1988. – 132 с.
14. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» [Текст] / С. И. Баскаков; 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2000. – 462 с.
15. Нікітчук, Т. М. Метод фазової площини як спосіб дослідження стану серцево-судинної системи на основі аналізу пульсової хвилі [Текст] / Т. М. Нікітчук // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – Вип. 48. – С. 179–185.