

УДК 681.335

**Дегтярук В.І.**

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова  
Національної академії наук України

**Будник М.М.**

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова  
Національної академії наук України

**Ходаковський М.І.**

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова  
Національної академії наук України

**Мудренко М.І.**

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова  
Національної академії наук України

**Мєшков В.В.**

Науково-виробниче підприємство «Метекол»

## РОЗРОБЛЕННЯ ФОТОМЕТРИЧНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ПУЛЬСОМЕТРІЇ

*Наведено результати розроблення фотоплетизмографів – приладів для вимірювання сигналів пульсуючої артеріальної крові, тобто пульсової хвилі в різних ділянках тіла людини. Вимірювання проводиться неінвазивно за допомогою зондуючого пучка світла, без пошкодження шкіри та відбору крові. За допомогою комп'ютерного оброблення пристрій надає великий об'єм інформації про стан судин і рух крові в різних ділянках тіла. Модуль аналізу та розрахунку параметрів пульсових хвиль дозволяє виконувати функцію усереднення пульсового циклу. Прилад дозволяє без великих зусиль і витрат повернути ендотелій судин до здорового стану.*

**Ключові слова:** фотоплетизмограф, пульсова хвиля, коефіцієнт оберненого світлорозсіювання, диференційна пульсографія, фотометрична система.

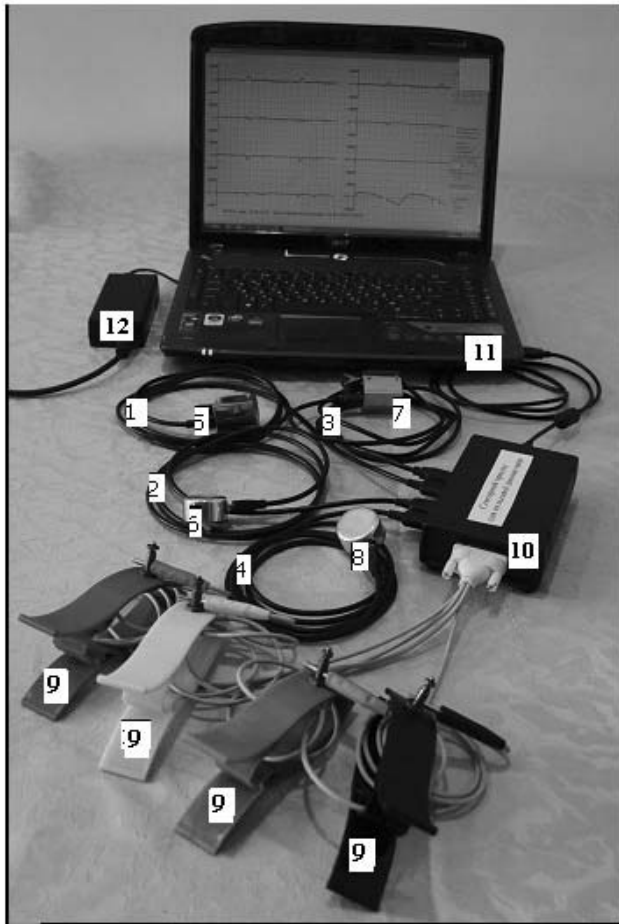
**Постановка проблеми.** Фотометричний метод реєстрації пульсових хвиль поєднує в собі всі переваги традиційних методів. Крім високої інформативності, він дозволяє виконувати дослідження протягом тривалого часу без впливу на перебіг досліджуваних процесів. Це дає можливість аналізувати досить тривалі відрізки записів пульсу, що дозволяє відслідковувати та давати цифрову чи кількісну оцінку окремих компонентів пульсових кривих, які мають самостійний характер, і за аналогією з ритмологічним підходом до динаміки серцевої діяльності [1; 2] з'являється можливість визначити вплив нервової та гуморальної регуляції на скорочувальну активність як судинної системи, так і серця. Аналіз повільних процесів у серцево-судинній системі може дати можливість виявити динаміку, яка пов'язана зі збудженням вазомоторного центру в центральній нервовій системі, гуморальний і метаболічний вплив на клітини гладких м'язів судинних стінок, які дуже чутливі до нього. Ще один надзвичайно

важливий аспект таких досліджень – оцінка функції ендотелію судин. Нещодавно вчені прийшли до висновку, що ендотеліальна дисфункція – одне з перших свідчень захворювання серцево-судинної системи, яке визначається клінічно і є його предиктором за кілька років до проявів захворювання. Ендотеліальна дисфункція вражає майже 50% людей віком за 40 років. Але рання діагностика цієї патології дозволяє без великих зусиль і витрат повернути ендотелій судин до здорового стану [3; 4].

**Постановка завдання.** Для одержання в повному об'ємі діагностичної інформації виникає необхідність оброблення й аналізу великих масивів даних. Це передбачає використання в складі фотометричних приладів сучасних засобів електронно-обчислювальної техніки, яка дозволить отримувати не тільки кількісні значення окремих параметрів, а й розпізнавати образи, що стосовно дослідження серцево-судинної системи дозволяє вирішити широке коло задач (від розпізнавання

окремих елементів кривих до постановки діагнозу).

**Виклад основного матеріалу дослідження.**  
**Призначення та принцип роботи приладу.**  
 Фотоплетизмограф – це медичний прилад, призначений для діагностики й локальної точкової реєстрації зміни оптичної густини досліджуваної ділянки тіла людини за допомогою двох монохроматичних джерел у червоних областях спектра світла й оптоелектричного перетворювача віддзеркаленого світла у відбитому світлі, розміщених з одного боку поверхні тіла людини. Такий прилад реєструє сигнали пульсуючої артеріальної крові, тобто пульсову хвилю, у різних ділянках тіла із записом даних у пам'ять персонального комп'ютера з подальшим обробленням результатів і візуалізацією в цифровій і графічній формах [5; 6]. Склад вимірювального модуля фотоплетизмографа поданий на рис. 1.

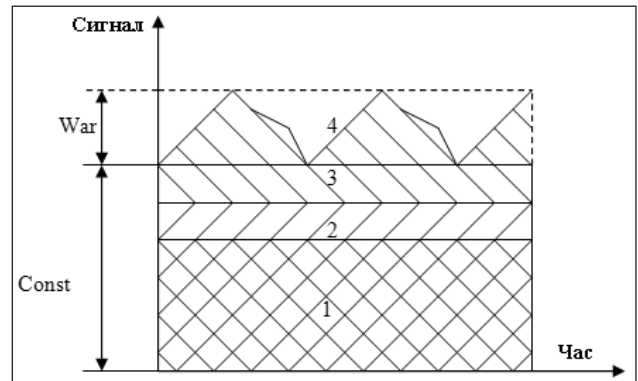


**Рис. 1. Загальний вигляд фотоплетизмографа:**  
 1–4 – кабелі USB до оптичних головок;  
 5–8 – оптичні головки; 9 – ЕКГ електроди;  
 11 – ноутбук; 12 – адаптер живлення;  
 10 – блок оброблення сигналів

Вимірювання проводять неінвазивно зонду-ючим пучком світла, без пошкодження шкіри та

відбору крові. Процес одержання інформаційного сигналу показаний на рис. 2.

Особливості пульсової хвилі в системі кровообігу полягають у тому, що порівняно із загальним кровонаповненням досліджуваної ділянки тіла вони мають надзвичайно малу амплітуду, і для того, щоб їх розрізнити, необхідно компенсувати постійну складову частину сигналу, яка може змінюватися залежно від багатьох факторів у дуже широких межах.



**Рис. 2. Формування інформаційного сигналу:**  
 1 – компоненти біотканини пальця (епідерміс, дерма, жирова тканина, м'язова тканина, кісткова тканина); 2 – венозна кров; 3 – неппульсуюча артеріальна кров; 4 – пульсуюча артеріальна кров. Const – постійна складова частина кровонаповнення досліджуваної ділянки тіла; War – змінна складова частина кровонаповнення

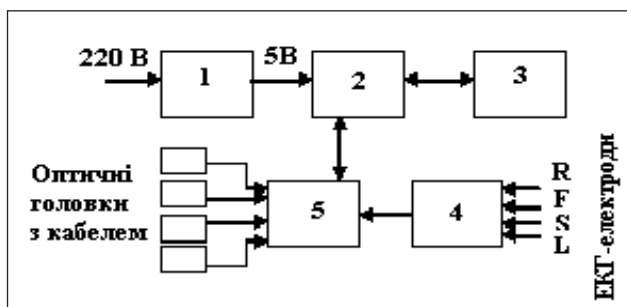
Пристрій може збиратися за багатоканальною схемою й дозволяє в реальному часі спостерігати перебіг пульсових хвиль як у кінцівках, так і в інших ділянках тіла. Два опромінювачі направляють світловий потік у досліджувану ділянку тіла. Частина світла розсіюється, частина – віддзеркалюється, частина – поглинається гемоглобіном крові. Зворотний потік світла, промодульований кровонаповненням, потрапляє на вхід оптоелектричного перетворювача, у якому відбувається підсилення сигналу, і на його виході формується електричний еквівалент кровонаповнення.

Фотоплетизмограф може виконувати операцію віднімання постійної складової частини (позначено “Const” на рис. 3) від суміші сигналів і виділяє змінну складову частину, яка використовується для одержання результату дослідження. Для виконання такого віднімання джерело випромінювання – червоний світлодіод – розташовується навпроти чутливого елемента оптико-електронного приладу (далі – ОЕП). На вхід еталонного джерела випромінювання подається струм, який забезпечує інтенсивність випромінювання, що відповідає середній величині кровонаповнення.

Віднімання постійної складової частини відбувається так. Аналоговий сигнал подається з виходу вихідного підсилювача за допомогою фільтра інфранизьких частот, який виділяє частину вхідного сигналу в червоній частині спектра. Таким чином на вхід вхідного підсилювача приходить сигнал, від якого віднімається змінний складник. Синхронне використання двох каналів дозволяє встановлювати амплітудні та фазові характеристики пульсових процесів, які відбуваються в різних ділянках тіла.

Оптичні головки дозволяють отримувати інформацію про перебіг пульсових процесів у різних ділянках тіла й виконати контурний аналіз пульсової хвилі. Набір оптичних головок дозволяє отримати інформацію з диференційної пульсографії, діагностики ендотеліальної дисфункції, визначення швидкості розповсюдження пульсових хвиль, ригідності судин, контурного аналізу пульсових хвиль. Для одержання інформаційного сигналу використовують чотири фотоплетизмографічні (далі – ФПГ) головки з чотирма оптичними каналами. Два сенсорних датчики одягаються на пальці рук, а інші два прикладаються до поверхні тіла пацієнта.

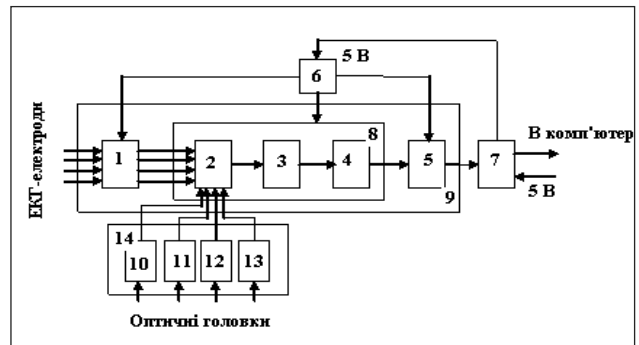
**Будова та робота приладу.** Фотоплетизмограф складається з блоку оброблення сигналів, джерела живлення, ноутбука, програмного забезпечення, ЕКГ кабелю, чотирьох оптичних головок, чотирьох ЕКГ електродів; блок-схема наведена на рис. 3.



**Рис. 3. Блок-схема фотоплетизмографа:**  
1 – джерело живлення; 2 – ноутбук;  
3 – програмне забезпечення; 4 – ЕКГ кабель;  
5 – блок оброблення сигналів

Сигнали, які надходять з оптичних головок і ЕКГ електродів, надходять для оброблення в блок обробки сигналів. На рис. 4 наведена блок-схема блоку обробки сигналів. Із ФПГ каналу напруга 5В подається в оптичну головку для живлення опромінювача. Опромінювач направляє світловий потік вибраної довжини хвилі в досліджувану ділянку тіла. Сигнали від ЕКГ модуля 9 і ФПГ модуля надходять у мультиконтролер 9, де проходять обробку на мультиплексі 2, АЦП 3 і мікро-

процесорі 4. Із мікроконтролера 9 сигнал у цифровому вигляді через гальванічну розв'язку 5, роз'єм USB 7 надходить на оброблення в комп'ютер.

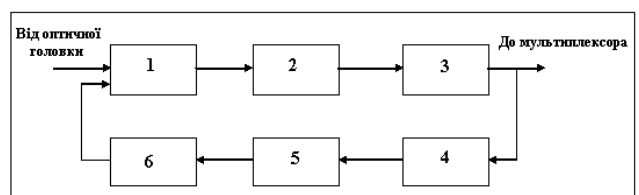


**Рис. 4. Схема блоку оброблення сигналів:**  
1 – аналоговий інтерфейс ADAS 1000;  
2 – мультиплексор; 3 – АЦП; 4 – мікропроцесор;  
5 – гальванічна розв'язка AD M 4160;  
6 – перетворювач напруги LP 2992; 7 – USB роз'єм;  
8 – мікроконтролер ADUC 842 Analog Devices; 9 – ЕКГ модуль; 10–13 – ФПГ канали;  
14 – ФПГ модуль

У мікроциркуляторних дослідженнях обираються ділянки, у яких відсутні великі судини (наприклад кінцеві фаланги пальців). Частина світла розсіюється, частина – віддзеркалюється, частина – поглинається гемоглобіном крові.

Зворотний потік світла потрапляє на вхід оптоелектричного перетворювача, і на його виході формується електричний еквівалент кровонаповнення. Опромінювач і оптоелектричний перетворювач розташовані в одному корпусі, який являє собою оптичну головку.

До складу ФПГ каналів входить вхідний підсилювач, фільтр низьких частот, вихідний підсилювач, фільтр інфранизьких частот, буферний підсилювач і балансувальний підсилювач. На рис. 5 наведена блок-схема ФПГ каналу.



**Рис. 5. Блок-схема ФПГ каналу:**  
1 – вхідний підсилювач; 2 – фільтр низьких частот;  
3 – вихідний підсилювач; 4 – фільтр інфранизьких частот;  
5 – буферний підсилювач;  
6 – балансувальний підсилювач

Сигнал підсилюється вхідним підсилювачем 1 і потрапляє на фільтр нижніх частот 2, який обмежує спектр вихідного сигналу для зменшення рівня шумів, які супроводжують корисний

сигнал. Далі відфільтрований сигнал підсилюється до необхідного рівня вихідним підсилювачем 3 і передається на оброблення в комп'ютер. Аналоговий сигнал із виходу вихідного підсилювача 3 за допомогою фільтра інфранизких частот 4, який виділяє частину вхідного сигналу в червоній частині спектра, через буферний підсилювач 5 потрапляє на вхід балансувального підсилювача 6. Таким чином, на вхід вхідного підсилювача 1 приходиться сигнал, від якого віднімається змінна складова частина.

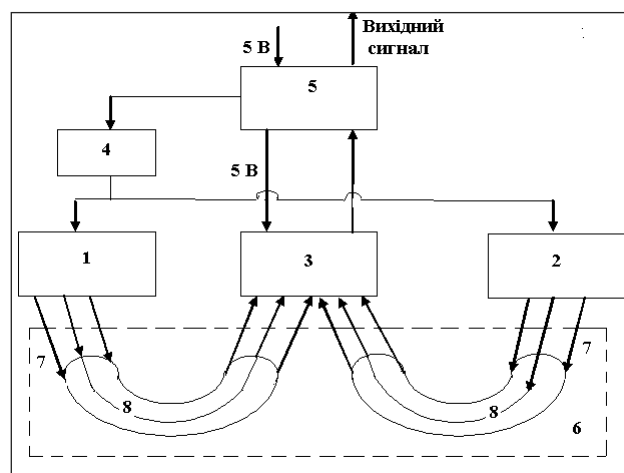
Синхронне використання двох каналів дозволяє встановлювати амплітудні та фазові характеристики пульсових процесів, які відбуваються в різних ділянках тіла. Після оброблення графік процесу та його цифрові параметри відображаються на моніторі й використовуються лікарем у якості діагностичної інформації.

Оптичні головки дозволяють отримувати інформацію про перебіг пульсових процесів у різних ділянках тіла й виконати контурний аналіз пульсової хвилі. Набір оптичних головок дозволяє отримати інформацію з диференційної пульсографії, діагностики ендотеліальної дисфункції, визначення швидкості розповсюдження пульсових хвиль, ригідності судин, контурного аналізу пульсових хвиль. На рис. 6 показаний принцип взаємодії оптичної головки з біооб'єктом.

Оптичні головки складаються з двох світлодіодів 630нм LUR 3333H Ligitek Electronics і оптоелектронного перетворювача – фотоприймача OPT 101 Texas Instruments. Опромінювач і ОЕП розташовані в одному корпусі головки. Два світлодіоди необхідні для отримання сигналу з досліджуваного об'єкта (палець або поверхня тіла людини), оскільки сигнал формується під час взаємодії червоного випромінювання з гемоглобіном шкіри людини.

Оптичні головки складаються з двох світлодіодів 630нм LUR 3333H Ligitek Electronics і оптоелектронного перетворювача – фотоприймача OPT 101 Texas Instruments. Опромінювач і ОЕП розташовані в одному корпусі головки. Два світлодіоди необхідні для отримання сигналу з досліджуваного об'єкта (палець або поверхня тіла людини), оскільки сигнал формується під час взаємодії червоного випромінювання з гемоглобіном шкіри людини.

Траєкторії проходження світла від світлодіодів зумовлені багатократними його розсіюваннями на



**Рис. 6.** Принцип взаємодії оптичної головки з біооб'єктом: 1, 2 – світлодіоди; 3 – оптоелектронний перетворювач OPT 101; 4 – вузол регулювання яскравості світлодіодів; 5 – роз'єм USB; 6 – досліджуваний об'єкт; 7 – промені світла від світлодіода; 8 – область дифузного розсіювання в біотканині

малі кути. Пучок найбільш імовірних траєкторій групується навколо траєкторії, близької до дуги кута, уздовж якої багатократні розсіювання відбуваються на однакові найменші можливі кути. Такий пучок траєкторій створює зону у формі банана [7].

Модуль аналізу та розрахунку параметрів пульсових хвиль дозволяє виконувати функцію усереднення пульсового циклу, автоматичне розміщення основних кодуєчих точок пульсової кривої, визначення частоти серцевих скорочень.

**Висновки.** Створено прилад фотоплетизмограф для дослідження пульсу пацієнта, зокрема в мікроциркуляторному руслі. Прилад виконує діагностику й точкову реєстрацію зміни оптичної густини крові досліджуваної ділянки тіла людини. Відфільтрований сигнал підсилюється до необхідного рівня вихідним підсилювачем і передається на оброблення в комп'ютер. За допомогою комп'ютерної обробки й програмного забезпечення пристрій надає великий об'єм інформації про стан судин і рух крові в різних ділянках тіла, що може бути використано для медичної діагностики. Під час виконання досліджень із розроблення фотоплетизмографа було виготовлено 10 дослідних зразків. Три зразки пройшли державну метрологічну атестацію. Два зразки проходять випробування для отримання медичного сертифіката.

#### Список літератури:

1. Самойленко А.В., Орлов В.А. Использование вычислительных методов и моделирования при изучении сердечно-сосудистой системы. Методы исследования кровообращения. Л.: Наука. 1976. 270 с.

2. Дегтярук В.І. Пульсові процеси в серцево-судинній системі людини та їх використання для діагностики. Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України «Комп'ютерні засоби, мережі та системи». Київ, 2014, № 13. С. 43–52.
3. Дегтярук В.І., Будник М.М., Штефан І.В. Спосіб аналізу для неінвазивної діагностики системи кровообігу. Патент України на винахід UA 75040, опубл. 26.11.2012 г.
4. Дегтярук В.І., Будник М.М., Чайковський І.А. й ін. Спосіб реєстрації пульсових хвиль в організмі людини. Патент України на винахід UA 111744, опубл. 25.11.2016 г.
5. Ходаковський М.І., Будник М.М., Лебедева Т.С., Шпильовий П.Б., Мержвинський П.А., Дегтярук В.І., Риженко Т.М., Тимошенко Я.М., Грищенко Л.В., Расчектаєва А.І., Тимофєєв Є.П. Оптичні біомедичні прилади та їх метрологічне забезпечення. Тези X міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірвальна техніка». 5–7 жовтня 2016 р. Ін-т метрології. Харків. 2016. С. 120.
6. Ходаковський М.І., Будник М.М., Лебедева Т.С., Шпильовий П.Б., Мержвинський П.А., Дегтярук В.І., Риженко Т.М., Тимошенко Я.М., Грищенко Л.В., Расчектаєва А.І., Тимофєєв Є.П. Забезпечення єдності вимірювань у біомедичних оптичних приладах. Метрологія та прилади. 2017, № 1. С. 25–36.
7. Войтович І.Д., Корсунський В.М. Інтелектуальні сенсори. Київ: Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України. 2007. 513 с.

### **РАЗРАБОТКА ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ПУЛЬСОМЕТРИИ**

*Приведены результаты разработки фотоплетизмографов – приборов для измерения сигналов пульсирующей артериальной крови, то есть пульсовой волны в различных участках тела человека. Измерение проводится неинвазивно с помощью зондирующего пучка света, без повреждения кожи и отбора крови. С помощью компьютерной обработки прибор предоставляет большой объем информации о состоянии сосудов и движении крови в различных участках тела. Модуль анализа и расчета параметров пульсовых волн позволяет выполнять функцию усреднения пульсового цикла. Прибор позволяет без больших усилий и затрат вернуть эндотелий сосудов в здоровое состояние.*

**Ключевые слова:** фотоплетизмограф, пульсовая волна, коэффициент обратного светорассеяния, дифференциальная пульсография, фотометрическая система.

### **DEVELOPMENT OF PHOTOMETRIC DEVICES FOR PULSOMETRY**

*The results of development of the photoplethysmographs – devices for measuring signals from pulsed arterial blood, that is the heart pulse wave in different parts of the human body, are presented. Non-invasive measurement is performed based on test light beam, without damage to the skin and invasive blood test. Based on computer processing the device provides a large amount of information about the the state of vessels and blood flow in different parts of the body. The module for analysis and calculation of pulse wave parameters allows performing the function of averaging the pulse cycle. The device allows you to return the endothelium of the vessels to a healthy state without much effort and expense.*

**Key words:** photoplethysmograph, heart pulse wave, inverse light scattering coefficient, differential pulsography, photometric system.