

УДК 615.471.03:616.073

**В. С. Павлов; Н. І. Заболотна, д-р техн. наук, проф.; В. С. Поліщук;  
А. І. Даліщук; Я. Г. Скорюкова, канд. техн. наук, доц.; Ян Лунінь**

## **БІОМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФІЧНИХ СИГНАЛІВ В КЛІНІЦІ ЩЕЛЕПНО-ЛИЦЕВОЇ ХІРУРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ**

*Це дослідження направлене на підвищення ефективності оброблення сигналів фотоплетизмографії (ФПГ), які мають низку переваг перед традиційними біометричними методами. Було створено комплексну методику для реєстрації ФПГ сигналів від 95 пацієнтів за допомогою оптико-електронної системи оцінювання тканинної мікроциркуляції. Фотоплетизмографічні сигнали були перетворені в двовимірні вигляд за допомогою матриці Грама. Для аналізу та автентифікації використовувалася модель EfficientNetV2 B0, яка інтегрована з мережею довготривалої короткочасної пам'яті (ДКП), що дозволило досягти точності інтерпретації 99 %. Удосконалена модель була додатково перевірена для ідентифікації в реальному часі, що підкреслює її ефективність і надійність для систем біометричного розпізнавання. Загалом це дослідження вирішує ключові проблеми біометричної автентифікації шляхом використання переваг ФПГ сигналів і сучасних методологій глибокого навчання, дозволяючи підвищити ефективність застосування біомедичних систем. Значною перевагою підходу є його застосовність під час обробки сигналів в реальному часі. Розроблена оптико-електронна система, яка включає в себе збір, попередню обробку та класифікацію сигналів ФПГ в режимі реального часу, демонструє практичну доцільність біометричних систем на основі ФПГ. Оптико-електронна система для оцінювання тканинної мікроциркуляції дозволяє реєструвати та обробляти ФПГ сигнали частини тіла, що додає системі універсальності. Це дослідження вирішує ключові проблеми біометричної автентифікації шляхом використання переваг ФПГ сигналів і сучасних методологій глибокого навчання, дозволяючи підвищити ефективність застосування біомедичних систем. Значною перевагою підходу є його застосовність при обробці сигналів в реальному часі. Розроблена оптико-електронна система, яка включає в себе збір, попередню обробку та класифікацію сигналів ФПГ в режимі реального часу, демонструє практичну доцільність біометричних систем на основі ФПГ.*

**Ключові слова:** сигнали фото плетизмографії, двовимірні вимірювання, перетворення матриці Грама, глибоке навчання, класифікація, прогнозування в реальному часі.

### **Вступ**

У наявній літературі є значна кількість робіт, яка присвячена дослідженню стану тканинної мікроциркуляції. Порушення мікроциркуляції відіграють ключову роль в патогенезі запальних захворювань пародонту і корелюють зі ступенем їх тяжкості. У міру прогресування і поширення патологічного процесу порушення мікроциркуляції зростають, а зміни в судинах набувають домінуючий характер. У клінічній стоматології обстеження мікроциркуляторної системи всіх тканин і органів порожнини рота становить суттєву зацікавленість як один з методів дослідження кровопостачання тканин [1, 2, 3].

Останнім часом недостатніми є використання традиційних методів обстеження та діагностики: огляд, перкусія, електроодонтодіагностика, реографія, рентгенографія та ін. Для поглибленого вивчення стану тканин і органів щелепно-лицевої ділянки розробляються нові, більш ефективні методи диференціальної діагностики з використанням лазерних і оптико-електронних комп'ютеризованих систем та комплексів. На сьогодні лазерні технології лікування та діагностування використовуються в стоматологічних закладах багатьох країн світу.

Фотоплетизмографічний метод (ФПМ) діагностики відноситься до методів, заснованих на застосуванні лазерних і оптико-електронних приладів та дозволяє вимірювати кровонаповнення і кровообіг в венах, артеріях, периферичних судинах і капілярах і базується на реєстрації кров'яного потоку з використанням оптичного джерела в інфрачервоному або

червоному діапазонах. Чим більше кров'яний потік, тим менше світла поглинається в тканинах організму, отже, більше світла приходить на оптичний сенсор. Фотоплетизмограма дозволяє вимірювати об'ємний пульс крові, викликаний періодичною зміною об'єму крові при кожному ударі серця, частоту серцебиття, варіабельність серцевого ритму. ФПГ сигнал має специфічну форму, яка варіюється у різних людей, що робить його корисним для біометричної ідентифікації після вилучення його ознак. Як показано на рис. 1, сигнал ФПГ включає систолічний пік/амплітуду (1), що представляє максимальний кровообіг під час серцевого циклу; діастолічний пік/амплітуда (2), що представляє мінімальний кровообіг; амплітуда дикротичної виїмки (3), що представляє собою невеликий провал ФПГ сигналу, що виникає в кінці систоли внаслідок закриття аортального клапана [3, 4, 5].



Рис. 1. Особливості сигналу фотоплетизмографії (ФПГ)

### Проблема, яка вирішується

Адаптивність ФПГ сигналу займає одне з ключових місць, особливо з розвитком технологій штучного інтелекту для біометричної ідентифікації. При цьому ФПГ сигнал представляється, як динамічне джерело інформації. Глибоке навчання ФПГ має значний інтерес завдяки своїй здатності виявляти складні закономірності та представлення з великих наборів даних [5, 6].

Моделі глибокого навчання, включаючи згорткові нейронні мережі (CNNs) і рекурентні нейронні мережі (RNNs), є високоефективними для пошуку значущих інформаційних ознак і надання точних прогнозів [7] при діагностуванні. Моделі глибокого навчання ідентифікують складні закономірності та адаптуються до індивідуальних варіацій, що підвищує їх точність і надійність у біометричній ідентифікації. Системи аутентифікації на основі ФПГ також виграють від можливості забезпечувати безперервну та пасивну верифікацію. Однак аналіз ФПГ із глибоким навчанням має певні артефакти, як варіації сигналів PPG через відтінок шкіри, артефакти руху та фактори навколишнього середовища, що може вплинути на продуктивність системи. Крім того, ефективний збір і попередня обробка високоякісних даних ФПГ мають вирішальне значення для розробки надійних моделей глибокого навчання.

Вирішення цих проблем передбачає ретельну обробку даних, складні методи попередньої обробки та ретельну оптимізацію моделі.

**Метою статті** є підвищення продуктивності наявних алгоритмів скорочення для розпізнавання сигналу ФПГ у двовимірному представленні.

### Метод

Для досягнення мети було проведено комплексний аналіз збору сигналів ФПГ від 95-ти пацієнтів, застосовано методи фільтрації та аугментацію під час попередньої обробки ФПГ сигналів, а також перетворення біомедичних даних у двовимірний формат за допомогою матриць Грама. Дослідження націлені на класифікацію сигналів ФПГ для систем прогнозування в реальному часі, спрямованої на підвищення ефективності та результативності додатків біометричного розпізнавання.

Дослідження дозволили розвинути напрямок біометричної аутентифікації, досліджуючи ефективність сигналів фотоплетизмографії (ФПГ) у поєднанні з методами глибокого навчання.

Основні результати дослідження полягають у тому:

1. Збір та обробка сигналів: розроблена програма збору та аналізу ФПГ сигналів. Ця система розроблена таким чином, щоб бути ефективною, надійною та зручною для користувача, з простими програмними інтерфейсами, які роблять її доступною навіть для розробників, які не є експертами. Зібрані сигнали були оброблені в двовимірні представлення за допомогою техніки перетворення матриці Грама, що розширює аналіз біомедичних даних.

2. Удосконалена модель біометричної автентифікації: було використано гібридну модель, що поєднує EfficientNetV2 B0 з мережею довготривалої короткочасної пам'яті (ДКП) для автентифікації користувача.

3. Аналіз в реальному часі. Оцінювання в сценаріях ідентифікації в реальному часі підкреслили високу точність та запам'ятовування. Цей аналіз підкреслює практичну цінність роботи, демонструючи інформативність ФПГ для безперервної біометричної автентифікації в різних напрямках біомедичних досліджень.

### Аналіз літературних джерел

Біометрична аутентифікація з використанням сигналів PPG в останні роки привернула значний інтерес. Ці сигнали, які відображають об'ємні зміни в кровоносних судинах, пропонують чіткі фізіологічні дані, корисні для ідентифікації та аутентифікації користувача. Методи глибокого навчання, такі як згорткові нейронні мережі (CNNs), рекурентні нейронні мережі (RNNs) та моделі на основі трансформаторів, були використані для вилучення ознак та виявлення закономірностей у ФПГ сигналах [8]. Існують деякі попередні роботи з 2-D представлення кількох біологічних сигналів, таких як ЕКГ, ЕМГ, ЕЕГ та ФПГ для біометричної ідентифікації, що дозволить нам проаналізувати та довести дискримінованість сигналів ФПГ як біометричних ознак [10, 11, 12].

Ці дослідження вивчають застосування біологічних сигналів, таких як ЕКГ, ЕМГ, ЕЕГ і ФПГ, для біометричного розпізнавання шляхом перетворення їх у двовимірні зображення. Такий підхід обґрунтовується даними, які вказують на те, що ці сигнали забезпечують підвищену безпеку та вищу точність порівняно з альтернативними методами. Крім того, інтеграція PPG з методами глибокого навчання (DL) виявила значний потенціал для біометричної аутентифікації [13, 14, 15].

## Сильні та слабкі сторони останніх пов'язаних досліджень [7]

Дослідження	Тип сигналу	Переваги	Обмеження	Показники ефективності
Li Zhang та інш.(2018) [9]	ФПГ	Висока точність, ефективні моделі глибокого навчання	Обмежена кількістю даних на кінчиках пальців, малий розмір набору даних	Висока точність 93,6%
Hanilci та інш. (2019) [10]	ЕКГ	Ефективна 2-D архітектура CNN, швидка обробка	Висока обчислювальна складність, тривалий час навчання	Точність 88,57%
M. Kim та інш. (2019) [11]	ЕКГ	Підвищена надійність, висока точність	Підвищена обчислювальна складність	Ідентичність – 97,2%
J. Kim та інш. (2021) [12]	ЕМГ	Висока ефективність розпізнавання жестів	Складність злиття даних, ризики перенавчання	64,7% біометричних показників
D. Labati та інш. (2021) [13]	ФПГ	Висока точність, не потрібні фідуціальні точки	Обмежений обсяг набору даних, адаптивність моделі	Точність 99%
Bengie L. Ortiz та інш. (2022) [15]	ФПГ	Наскрізне навчання, надійний вибір функцій	Методи вилучення обмежених ознак	Точність 97,36%
M. Ibrahim. та інш.( 2023) [16]	ФПГ	Ефективне перетворення скалограм, висока точність	Комплексне злиття функцій, висока обчислювальна вартість	Точність 95%
Caiyu Wu та ін. (2022) [17]	ФПГ	Оптимальне 2-D представлення, знижені обчислювальні вимоги	Ризики перенавчання, залежність від великих наборів даних	Точність тестування 92,4%
Ali Cherry, та інш. (2025) [7]	ФПГ	Оптимальне 2-D представлення, знижені обчислювальні вимоги	Ризики перенавчання, залежність від великих наборів даних	Точність тестування 98,0%

Моделі глибокого навчання, застосовані до сигналів ФПГ від різних частин тіла або за допомогою дистанційного зондування, продемонстрували ефективні можливості ідентифікації особистості. Ґрунтуючись на цих фундаментальних досягненнях, наше дослідження ще більше вдосконалює сферу біометричної ідентифікації, вдосконалюючи наявні методології [16, 17].

## Матеріали та методи

Архітектура оптико-електронної системи для реєстрації ФПГ сигналів представлена на рис. 2. Оптичні сенсори дозволяють реєструвати ФПГ сигнали, які далі поступають на блок попередньої обробки етапи попередньої обробки, який виконує функції нормалізації та фільтрації. Після попередньої обробки набір даних перетворюється в 2D-формат і ділиться на підмножини навчання, перевірки та тестування. Потім навчальні дані доповнюються та обробляються за допомогою методів глибокого навчання. Нарешті, продуктивність моделі оцінюється за допомогою тестового набору даних. Оброблені дані перетворюються в 2D-формат і вводяться в задалегідь навчену модель, яка аналізує їх для точної ідентифікації користувача.

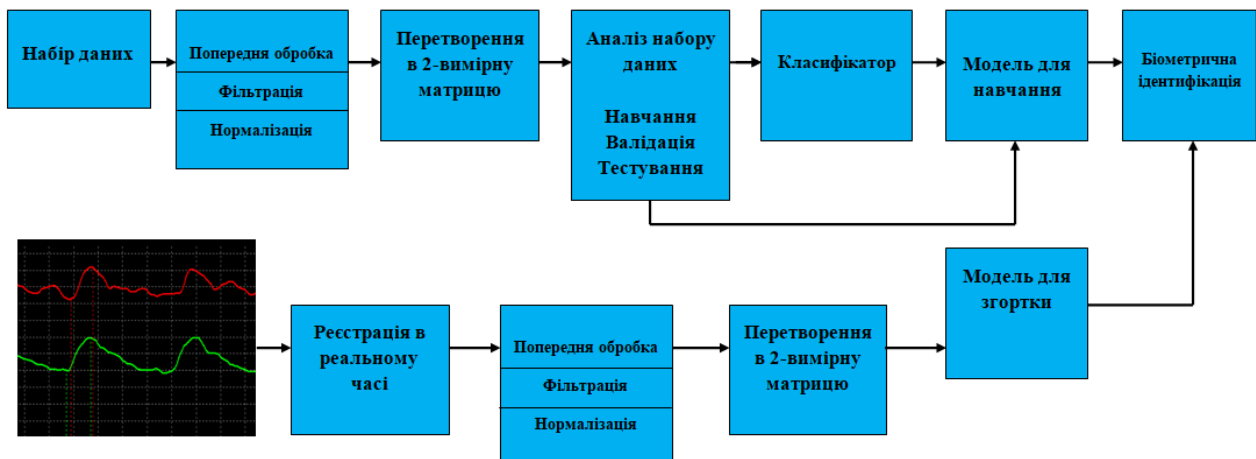


Рис.2. Структурна схема розробленої системи

### Методика опрацювання даних

Процес збору даних передбачає реєстрацію сигналів ФПГ за допомогою чітко визначеного протоколу та експериментальної установки. Цей розділ містить детальний опис методики, що використовуються для збору сигналів, використовуюваного обладнання та умов, за яких були отримані дані. Також буде надано огляд отриманого набору даних з висвітленням специфіки та характеристик зібраних сигналів ФПГ. Набір бази даних у кількості 95-ти пацієнтів був проведений на базі кафедри щелепно-лицьової хірургії Вінницького національного медичного університету ім. М. Пирогова. В ході набору біомедичних даних досліджувалася проблема етіології та патогенезу, характеру перебігу і способів лікування специфічних та неспецифічних одонтогенних гнійно-запальних процесів м'яких тканин обличчя та шиї [5], особливо на фоні захворювань печінки і жовчовивідних шляхів. Застосування оптичних методів дослідження дозволяли оперативно приймати рішення про методику лікування для прискорення регенерації післяопераційної рани, що дозволило зменшити число ускладнень при запальних процесах щелепно-лицьової ділянки без врахування умови для прояву власних сил організму, спрямованих на загоєння рани [5, 7, 8].

### Практична реалізація

Запропонована оптико-електронна система для оцінювання тканинної мікроциркуляції є формою біометричної ідентифікації, яка використовує сигнали фотоплетизмографії (PPG) для точної ідентифікації. Він складається з кількох ключових компонентів, призначених для ефективної реєстрації та обробки цих сигналів. Основні компоненти включають сенсор MAX30102, отриманий від Analog Devices, Inc., Норвуд, Массачусетс, США; мікроконтролер Arduino UNO, отриманий від Arduino S.r.l., Італія. На рис. 3 показана реалізація прототипу оптико-електронної системи для оцінювання тканинної мікроциркуляції [9].

Датчик MAX30102 використовує певні довжини хвиль світла (червоний, 660 нм та інфрачервоний (ІЧ) 940 нм) для точного вимірювання біометричних сигналів. У датчик вбудований високоефективний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), здатний перетворювати аналогові сигнали від фотодетекторів в цифрові дані з 18-бітною роздільною здатністю. Цей АЦП працює з частотою дискретизації до 1 кГц, підвищуючи точність отриманої біометричної інформації.

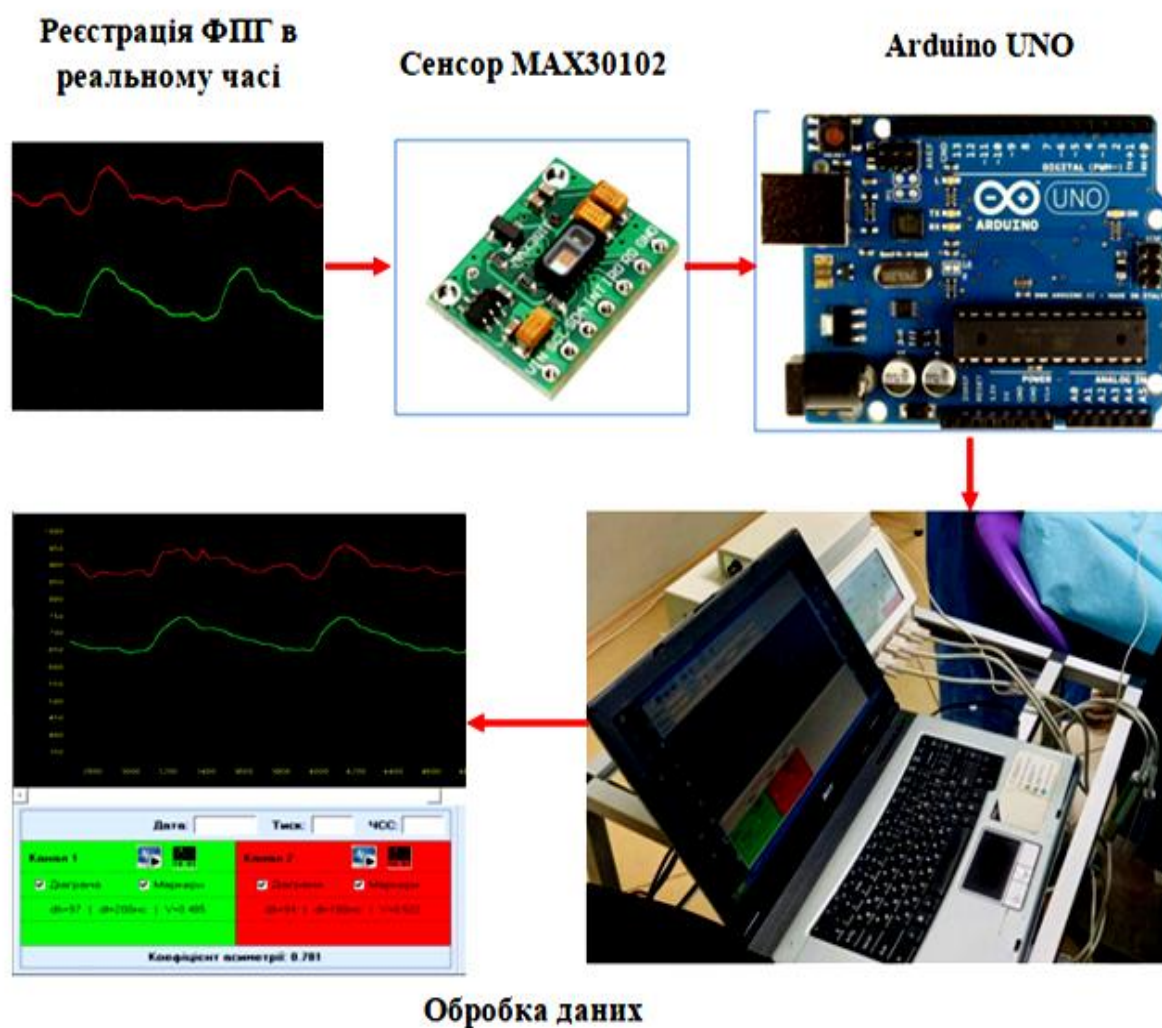


Рис. 3. Реалізація оптико-електронної системи для оцінювання тканинної мікроциркуляції

#### Аналіз даних

Набір бази даних у кількості 95-ти пацієнтів був проведений на базі кафедри щелепно-лицьової хірургії Вінницького національного медичного університету ім. М. Пирогова. В ході набору наданих досліджувалася проблема етіології та патогенезу, характеру перебігу і способів лікування специфічних та неспецифічних одонтогенних гнійно-запальних процесів м'яких тканин обличчя та шиї [1, 2, 15], особливо на фоні захворювань печінки і жовчовивідних шляхів. Для кожного учасника було записано 5 типів ФПГ, які характеризувалися оцінювання перебігу тканинної мікроциркуляції до лікування, в процесі лікування та після лікування. Дані, зібрані датчиком Max30102, який працює в інтерфейсі з Arduino, ефективно зберігаються в електронній таблиці Excel на комп'ютері за допомогою інструменту ArduSpreadsheet. Такий організований підхід забезпечує легкий доступ та ефективне управління даними. Щоб використовувати аналітичні можливості зібраних даних, ми використовували MATLAB для перетворення структурованої інформації з аркуша Excel у чіткий формат сигналу. Ця трансформація не тільки забезпечує кращу візуалізацію основних закономірностей даних, але й готує дані для подальшої попередньої обробки та аналізу в нашому дослідженні сигналів ФПГ для біометричної ідентифікації.

### Попередня обробка (фільтрація, нормалізація ФПГ сигналу)

Попередня обробка є одним з основних етапів аналізу сигналів. Він підвищує точність і завадостійкість за рахунок забезпечення узгодженості даних і поліпшення чіткості даних для алгоритмів [16].

Фільтрація та нормалізація є життєво важливими для покращення та уточнення якості даних перед їх подальшим аналізом. Методи фільтрації використовуються для зменшення або видалення небажаного шуму, зберігаючи основну інформацію та цілісність сигналу. Цей крок має важливе значення для покращення співвідношення сигнал/шум і забезпечення точності наступного аналізу. І навпаки, методи нормалізації стандартизують амплітуду і діапазон сигналу, забезпечуючи узгодженість і порівнянність між різними наборами даних. Зменшуючи варіації та вирівнюючи характеристики сигналу, нормалізація допомагає створити більш надійну та надійну основу для подальшої обробки та інтерпретації. Разом ці методи попередньої обробки створюють міцну основу для отримання значущих висновків із необроблених даних.

Сигнали, які ми отримуємо, як показано на рис.4, часто зазнають впливу адитивного шуму, який може порушити інформативність сигналу та негативно вплинути на загальну продуктивність системи. Щоб вирішити ці проблеми та забезпечити надійний подальший аналіз, ми впроваджуємо важливий етап попередньої обробки за допомогою медіанного фільтра. Цей фільтр застосовується для цифрових даних, підвищує точність, зберігаючи загальну тенденцію сигналу. Це досягається шляхом застосування згортки, апроксимації многочленів низького степеня до послідовних підмножин сусідніх точок даних через лінійні найменші квадрати.

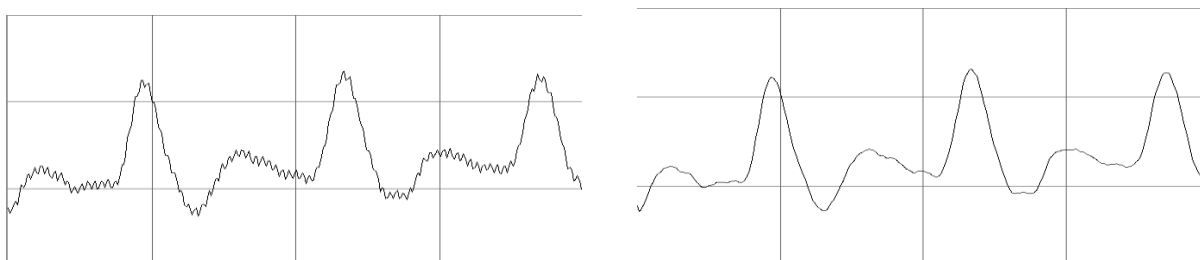


Рис. 4. Попередня обробка ФПГ сигналу за допомогою медіанного фільтра

Нормалізація досягається за допомогою різних методів, кожен з яких пристосований до конкретних цілей, але відмінності в діапазоні і масштабі можуть ускладнити прямі порівняння. Застосовується нормалізація для вирівнювання обох сигналів у загальному, заздалегідь визначеному діапазоні, забезпечуючи узгодженість і полегшуючи точне порівняння (рис. 5). Нормалізація min-max, також відома як масштабування ознак, описується рівнянням (1). Цей процес передбачає віднімання мінімального значення з кожної точки даних з подальшим діленням на діапазон (різницю між максимальним і мінімальним значеннями). Після нормалізації обидва сигнали мають однакові статистичні характеристики, що дозволяє проводити більш значущі та точні порівняння [17].

$$X' = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (1)$$

Цей процес полегшує візуалізацію, аналіз і порівняння, видаляючи ефекти різних масштабів і діапазонів. Це також скорочує час обчислень під час класифікації. Завдяки стандартизації сигналів до загального масштабу, будь то для побудови графіків або статистичного аналізу, підвищується надійність та інформативність при обробці даних.

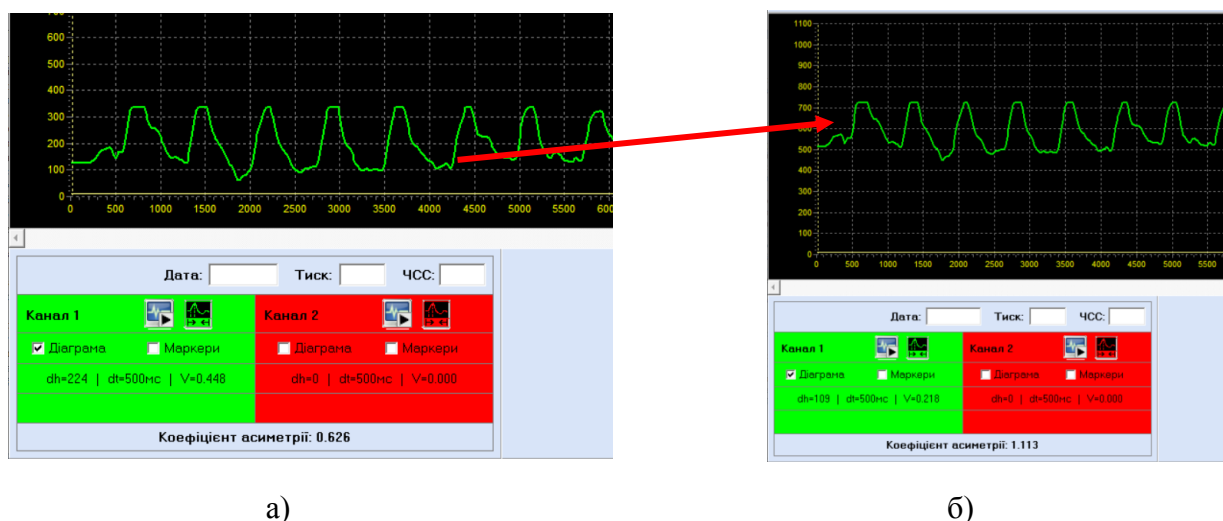


Рис. 5. Візуальне представлення попередньо обробленого сигналу ФПГ:  
(а) ненормалізований сигнал ФПГ; б) нормалізований сигнал ФПГ

### Перетворення сигналу в матрицю Грама

Перетворення одновимірного ФПГ сигналу в двовимірну матрицю Грама має вирішальне значення для ефективної обробки та аналізу сигналу. Це перетворення дає представлення час-частота, яке покращує виділення інформативних ознак, що призводить до більш точного та достовірного розпізнавання образів біомедичного сигналу. Двовимірна матриця Грама не тільки визначає поведінку сигналу, але й забезпечує вхідний сигнал для додатків машинного навчання, що дозволяє провести часові кореляції [19, 20]

Процес обчислення матриці Грама включає в себе такі етапи:

1. Ініціалізація: Масив даних ініціалізується для зберігання даних сигналу. Ці сигнали імпортуються в MATLAB і перетворюються в масиви, і кожен сигнал зберігається у вигляді рядка в масиві комірок.
2. Розрахунок матриці Грама: Для кожної пари сигналів,  $S_i$ ,  $S_j$ , запис матриці Грама  $G_{ij}$  обчислюється на основі рівняння (2):

$$G_{ij} = S_i, S_j = \sum_{k=1}^N S_{i,k} - S_{j,k}$$

3. Де  $S_i$ ,  $S_j$ , представляють  $i$ -ий і  $j$ -ий сигнали відповідно, а  $N$  позначає довжину кожного сигналу. Це обчислення фіксує попарні точкові добутки між сигналами, які є важливими для оцінки їх подібності. Отримана матриця Грама  $G$   $M \times N$  матриці, де  $M$  – кількість сигналів.
4. Візуалізація: Після обчислення матриці Грама, результат обробки візуалізується за допомогою функції “Imagesc” у MATLAB. Ця візуалізація представляє матрицю у вигляді зображення, з більш яскравими ділянками, що вказують на більшу схожість між сигналами. Кольорова шкала включена для інформативності.
5. Застосування: Матриця Грама та її візуалізація відіграють вирішальну роль у різних програмах, включаючи розпізнавання образів, оцінку подібності та вилучення ознак. Візуальне представлення, що забезпечується матрицею Грама, покращує інтерпретацію та аналіз складних наборів даних, наочно ілюструючи взаємозв'язки сигналів. Цей підхід дозволяє інформативно аналізувати ФПГ сигнали, застосовуючи машинне навчання. Крім того, універсальність обчислень матриці Грама робить її застосовною до систем біометричного розпізнавання, де її можна використовувати для порівняння таких ФПГ сигналів. Це підвищує точність та безпеку технологій біометричної аутентифікації за рахунок удосконалення процесів ідентифікації та верифікації [7, 21, 22].



Застосовуючи це перетворення, отримуємо матрицю Грама для кожного сигналу ФПГ (рис. 6).

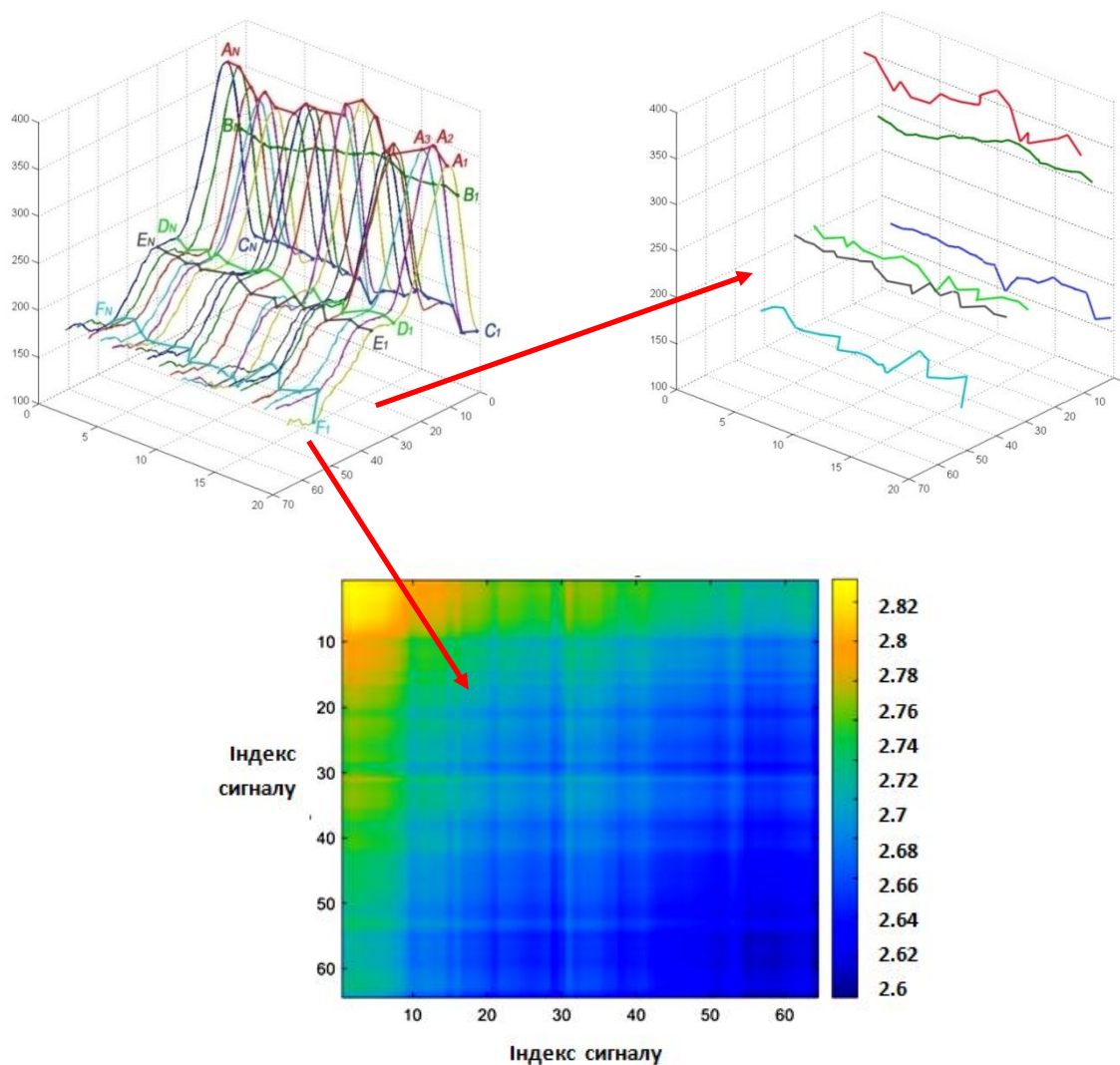


Рис.6. Визначення кривих, що характеризують основні параметри пульсових хвиль, динамічні криві основних параметрів та формування матриці Грама отриманого ФПГ сигналу

### Аналіз даних

У машинному навчанні вихідний набір даних зазвичай ділиться на дві або три підмножини, що сприяє ефективному навчанню та оцінюванню моделей. Часто використовуювані підмножини такі:

- Тренувальний набір: Ця підмножина використовується для тренування моделі, що дозволяє їй вивчати та оптимізувати свої параметри на основі цих даних.
- Набір валідації: також відомий як набір перехресної перевірки або перевірки моделі, ця підмножина використовується для налаштування параметрів навчання та оцінки продуктивності моделі. Це допомагає в оцінці точності моделі та відіграє важливу роль у виборі моделі [23, 24, 25].
- Тестовий набір: Ця підмножина використовується для оцінки продуктивності кінцевої моделі. Він забезпечує оцінку того, наскільки добре модель узагальнює невидимі дані, порівнюючи її результати з результатами з наборів навчання та валідації [26, 27, 28].
- На основі нашого отриманого набору даних про 95 здорових осіб, ми маємо загалом приблизно 450 сигналів ФПГ. Враховуючи відносно невеликий розмір цього набору

даних, ми розділили його на дві підмножини: одна для навчання класифікатора і одна для тестування, що складається з приблизно 60 сигналів PPG (близько 15 %).

### Обговорення та порівняльний аналіз

Результати, отримані в результаті досліджень, підкреслюють ефективність поєднання моделі EfficientNetV2 B0 з LSTM в обробці ФПГ сигналів для біометричного розпізнавання. Досягнута точність класифікації, особливо при використанні змішаного набору даних відфільтрованих і нефільтрованих сигналів ФПГ, перевершує багато наявних методів (рис. 7). Запропонована модель досягла точності тестування 99 % з мінімальними помилками в класифікації, про що свідчить матриця невідповідності. Ця продуктивність порівнянна або перевищує ту, що була проведена в попередніх дослідженнях з використанням сигналів ФПГ, таких як роботи Labati et al., Ali Cherry які також досягли 99 % точності, але використовували різні методології та методи попередньої обробки.

Порівняно з іншими біометричними методами, такими як сигнали ЕКГ або ЕМГ, наш метод показує високу ефективність. Наприклад, дослідження Hanilci et al. досягло точності 88,57 % за допомогою сигналів ЕКГ, тоді як Kim et al. повідомили про ефективність розпізнавання 97,2% з даними ЕКГ, обробленими глибокими CNN. Наш підхід не тільки перевершує ці результати, але й робить це з додатковою перевагою використання більш економічно ефективною та простішою для засвоєння біометричної ознаки — сигналів ФПГ.

### Матриця невідповідності

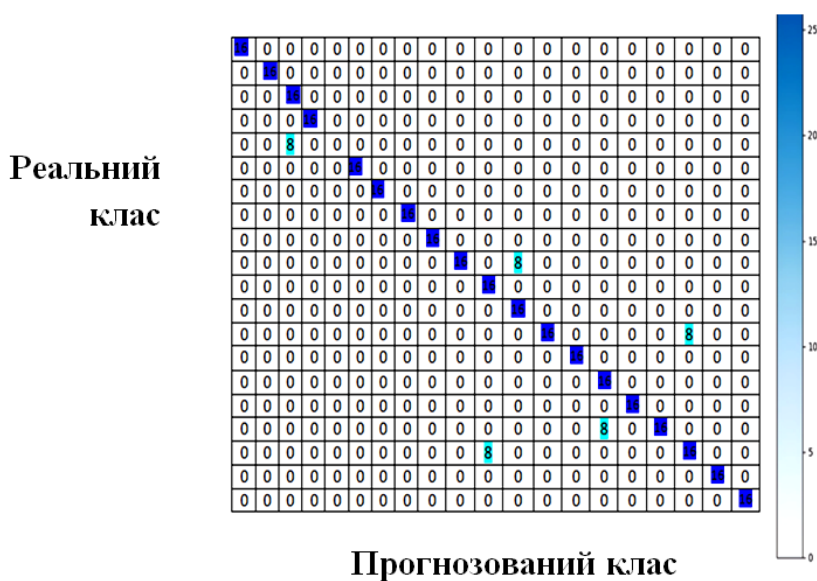


Рис. 7. Оцінювання точності класифікації

### Висновок

Значною перевагою підходу є його застосовність при обробці сигналів в реальному часі. Розроблена оптико-електронна система, яка включає в себе збір, попередню обробку та класифікацію сигналів ФПГ в режимі реального часу, демонструє практичну доцільність біометричних систем на основі ФПГ. Дизайн системи є достатньо зрозумілим графічним інтерфейсом користувача і підвищує зручність використання та гарантує її легку інтеграцію при обробці даних. Оптико-електронна система для оцінювання тканинної мікроциркуляції дозволяє реєструвати та обробляти ФПГ сигнали частини тіла, що додає системі універсальності.

Для аналізу та автентифікації використовувалася модель EfficientNetV2 B0, яка інтегрована з мережею довготривалої короткочасної пам'яті (ДКП), що дозволило досягти

точності інтерпретації 99 %. Удосконалена модель була додатково перевірена для ідентифікації в реальному часі, що підкреслює її ефективність і надійність для систем біометричного розпізнавання. Загалом це дослідження вирішує ключові проблеми біометричної автентифікації шляхом використання переваг ФПГ сигналів і сучасних методологій глибокого навчання, дозволяючи підвищити ефективність застосування біомедичних систем. Значною перевагою підходу є його застосовність при обробці сигналів в реальному часі. Розроблена оптико-електронна система, яка включає в себе збір, попередню обробку та класифікацію сигналів ФПГ в режимі реального часу, демонструє практичну доцільність біометричних систем на основі ФПГ.

Оптико-електронна система для оцінювання тканинної мікроциркуляції дозволяє реєструвати та обробляти ФПГ сигнали частини тіла, що додає системі універсальності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Medical fuzzy-expert system for prediction of engraftment degree of dental implants in patients with chronic liver disease / V. Polishchuk et al. *IAPGOS*. 2024. Vol. 14, №1. P. 90–95. <http://doi.org/10.35784/iapgos.5585/>.
2. Histological changes of bone tissue in the perforation defect site of the rat mandible when using hepatoprotector in obstructive hepatitis / S. S. Polishchuk et al. *World of medicine and biology*. 2020. №2 (72). P. 193–198.
3. Stathopoulos P, Rallis G. Poorly controlled diabetes mellitus is strongly associated with descending necrotizing mediastinitis of odontogenic origin. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol*. 2023 Sep 15. P. S2212–4403.
4. Biometrics, the Technology That Measures and Analyses Our Biological Data, Iberdrola. (accessed on 15 October 2023). URL: <https://www.iberdrola.com/innovation/advantages-and-uses-of-biometrics>.
5. Photoplethysmography Biometric Recognition Model Based on Sparse Softmax Vector and k-Nearest Neighbor / J. Yang et al. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020. Volume 2020, Article ID 9653470, P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/9653470>.
6. Features from the photoplethysmogram and the electrocardiogram for estimating changes in blood pressure / E. Finnegan et al. *Sci. Rep*. 2023. №13. P. 986.
7. Real-Time PPG-Based Biometric Identification: Advancing Security with 2D Gram Matrices and Deep Learning Models / A. Cherry et al. *Sensors*. 2025. №25. P. 40.
8. Wannenburg J., Malekian R. Body sensor network for mobile health monitoring, a diagnosis and anticipating system. *IEEE Sens. J*. 2015. №15. P. 6839–6852.
9. Medical image segmentation using deep semantic-based methods: A review of techniques, applications and emerging trends / I. Qureshi et al. *Inf. Fusion*. 2023. №90. P. 316–352.
10. Abbas Q., Baig A. R. Hussain A. Classification of Post-COVID-19 Emotions with Residual-Based Separable Convolution Networks and EEG Signals. *Sustainability*. 2023. №15. P. 1293.
12. Cheriyaedath S. News Medical & Life Sciences. URL: [https://www.news-medical.net/health/Photoplethysmography-\(PPG\).aspx](https://www.news-medical.net/health/Photoplethysmography-(PPG).aspx) (accessed on 18 November 2023).
13. Incel O. D., Bursa S. On-Device Deep Learning for Mobile and Wearable Sensing Applications: A Review. *IEEE Sens. J*. 2023. №23. P. 5501–5512.
14. Deep Learning for PPG-Based Biometric Identification / X. Li et al. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur*. 2018. №13. P. 2203–2213.
15. Hanilci A., Gürkan H. ECG biometric identification method based on parallel 2-d convolutional neural networks. *J. Innov. Sci. Eng. JISE*. 2019. №3. P. 11–22.
16. Kim M.-G., Ko H., Pan S. B. A study on user recognition using 2D ECG based on ensemble of deep convolutional Neural Networks. *J. Ambient. Intell. Humaniz. Comput*. 2019. №11. P. 1859–1867.
17. Kim J.-S., Kim M.-G., Pan S.-B. Two-step biometrics using electromyogram signal based on convolutional neural network-long short-term memory networks. *Appl. Sci*. 2021. №11. P. 6824.
18. Biometric recognition of PPG Cardiac signals using transformed spectrogram images. In Pattern Recognition / Donida Labati R. et al. ICPR International Workshops and Challenges, *Springer Nature: Berlin/Heidelberg, Germany*, 2021. P. 244–257.
19. Laser photoplethysmography in integrated evaluation of collateral circulation of lower extremities / S. V. Sander et al. *Proceedings of SPIE* 2015. №9816. P. 98161K.
20. Wójcik W., Smolarz A. Information Technology in Medical Diagnostics. *London, Taylor & Francis Group CRC Press Reference*. 2017. P. 210.
21. Photoplethysmographic technologies of the cardiovascular control / Pavlov S. V., Kozhemiako V. P., Petruk V. G., Kolesnik P. F. Vinnitsa: Universum-Vinnitsa, 2007. 254 p.
22. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2019 336 p.
23. Pavlov S. V., Kozhukhar A. T. Electro-optical system for the automated selection of dental implants according to their colour matching. *Przegląd elektrotechniczny*. 2017. R. 93. NR 3. P. 121–124. ISSN 0033-2097.

24. Information Conversion in Measuring Channels with Optoelectronic Sensors / V. Kukharchuk et al. *Sensors* 22. 2022. № 1: 271. <https://doi.org/10.3390/s22010271>.
25. Optoelectronic multispectral device for determining the state of peripheral blood circulation / Kozlovska T. I. et al. *Proc. SPIE 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*. 2020. V. 115810L. <https://doi.org/10.1117/12.2580360>.
26. Study of tissue microcirculation disorders after tooth extraction by photoplethysmography in diabetic patients / Kanishyna T. et al. *Proc. SPIE 12476, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*. 2022. V. 1247603. <https://doi.org/10.1117/12.2657895>.
27. Method of glitch reduction in DAC with weight redundancy / O. D. Azarov et al. *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications*. 2015. 98161T (17 December 2015). <https://doi.org/10.1117/12.2229045>.
28. Photodynamic therapy with laser scanning mode of tumor irradiation / V. Kholin et al. *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications*. 2015. 98161F (17 December 2015). <https://doi.org/10.1117/12.2229030>.
29. Polarimetric characterisation of histological section of skin with pathological changes / R. H. Rovira et al. *Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. 2016. 100313E (28 September 2016). <https://doi.org/10.1117/12.2249373>.

Стаття надійшла до редакції 10.03.2025.

Стаття пройшла рецензування 15.03.2025.

**Павлов Володимир Сергійович** – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, ORCID: 0000-0002-0717-7082, e-mail: machinehead6926@gmail.com.

**Заболотна Наталія Іванівна** – д-р техн. наук, професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, ORCID: 0009-0006-2209-8573, e-mail: natalia.zabolotna@gmail.com. Вінницький національний технічний університет.

**Поліщук Віталій Сергійович** – асистент кафедри хірургічної стоматології та щелепно-лицевої хірургії, ORCID: 0000-0001-7180-3650, e-mail: polischuk\_vitaliy@ukr.net. Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова.

**Даліщук Андрій Ігорович** – асистент кафедри хірургічної стоматології та щелепно-лицевої хірургії, ORCID: 0000-0002-5090-6172, e-mail: [andriy.dalishchuk@gmail.com](mailto:andriy.dalishchuk@gmail.com). Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова.

**Скорюкова Янина Германівна** – канд. техн. наук, доцент кафедри опору матеріалів, теоретичної механіки та інженерної графіки, ORCID:0009-0008-8137-4106, e-mail: yaskor@vntu.edu.ua.

**Ян Лунінь** – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, ORCID: 0009-0009-8240-2559, e-mail: [longyinyang966@gmail.com](mailto:longyinyang966@gmail.com). Вінницький національний технічний університет.