

І ОЛОВІ ПАЗОВОЇ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ВЧЕНОЇ РАДИ

Чорноморського національного університету

імені Петра Могили (м. Миколаїв)

доктору технічних наук, професору

Трунову Олександру Миколайовичу

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

професора, професора кафедри електронних обчислювальних машин

Національного університету «Львівська політехніка»

Глухова Валерія Сергійовича

на дисертаційну роботу Дарнапука Євгена Сергійовича на тему «Методи та засоби обробки медичних сигналів для підвищення ефективності діагностичних систем»

на здобуття наукового ступеня доктора філософії

зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи та зв'язок з науковими планами і програмами

Дана робота займає місце на стику комп'ютерної інженерії, інформаційно-вимірювальної техніки, математики та медицини. Центральну позицію при цьому займає комп'ютерна інженерія.

Розвиток технологій та методів комп'ютерної інженерії в області обробки медичних сигналів відіграє ключову роль у сучасній охороні здоров'я. Їх використання забезпечує підвищення точності діагностики за рахунок зменшення рівня шумів, автоматичного виділення патологічних ознак, а останнім часом і за рахунок використання алгоритмів машинного навчання для раннього виявлення захворювань. При цьому відбувається прискорення та автоматизація процесів діагностики, а також адаптація лікування під індивідуальні параметри пацієнта. Значним чинником є зниження навантаження на лікарів та автоматизація рутинних завдань (розшифрування ЕКГ, аналіз знімків), що у свою чергу веде до зменшення кількості людських помилок та вивільнення часу для складних лікарських випадків.

Розвиток комп'ютерних методів та засобів діагностики у свою чергу

підштовхує розвиток нових медичних технологій і, у цілому, збільшує економічну ефективність лікування шляхом зменшення витрат на лікування за рахунок ранньої діагностики та зменшення кількості госпіталізованих хворих внаслідок впровадження віддаленого діагностування.

Цифрові комп'ютерні технології та обробка медичних сигналів – це основа сучасної діагностики, лікування та профілактики захворювань. Їх розвиток безпосередньо впливає на якість та доступність медичної допомоги, що зрештою рятує життя. Тому ця робота, у якій розглядаються комп'ютерні методи та комп'ютерні засоби обробки медичних сигналів є актуальною та важливою.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до напрямку наукових досліджень кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили. Матеріали дисертаційного дослідження увійшли у заключний звіт з науково-дослідної роботи (НДР) «Розробка апаратно-програмного комплексу неінвазійного моніторингу тиску крові та частоти серцевих скорочень подвійного призначення» (№ ДР 0120U101266, 2020–2021 рр.), що фінансувалася з коштів державного бюджету. Наразі здобувач здійснює впровадження отриманих результатів власних досліджень як відповідальний виконавець НДР «Інженерія даних як процеси виявлення, збору, реєстрації та подальшої обробки даних в рамках побудови апаратно-програмної інфраструктури даних» (№ ДР 0125U000904, 2022–2029 рр.).

2. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обгрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Обгрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій базуються на методах статистичної обробки даних, методі покриття блоками для фрактальних структур, методах математичного моделювання часових рядів, методах аналізу головних компонентів, методах теорії розпізнавання образів, машинного навчання, інтелектуального аналізу даних, методах рекурентного аналізу та графіків Пуанкаре, методі сингулярних чисел та сингулярних векторів, методі цифрової фільтрації сигналів, метод кривих Ендрюса.

Крім того під час виконання дисертаційного дослідження використано

принципи проектування спеціалізованих обчислювальних систем на ПЛІС. Для фільтрації шумів та виділення інформативних компонент масивів даних медичних сигналів застосовано методи цифрової обробки сигналів. Також в роботі використано статистичні методи обробки даних, а для проектування і реалізації компонентів моделі семантично-підтримуваної медичної системи з застосуванням IoT технологій використано методи та технології збору даних нижніх рівнів багаторівневої платформи кіберфізичних систем. Дисертація є завершеною науковою працею, яка містить анотацію, перелік умовних позначень, вступ, 4 розділи, що містять рисунки, висновки по роботі, список використаних джерел з 178 найменувань і 3 додатків. Логічна структура роботи визначається її метою та сформульованими науковими і практичними завданнями.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційних досліджень, сформульовано мету дослідження та науково-технічні завдання, необхідні для її досягнення, показано зв'язок дослідження з науковими програмами та темами, наведено наукову новизну отриманих результатів, їх практичну цінність та особистий внесок здобувача, Подано відомості про апробацію результатів роботи, особистий внесок автора та його публікації.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану методів цифрової обробки медичних сигналів, які застосовуються для покращення діагностичних можливостей медичних систем. У ньому проаналізовано існуючі методи фільтрації шумів, такі як адаптивні фільтри, вейвлет-фільтрація та спектральні методи. Окрему увагу приділено алгоритмам вилучення характерних ознак із сигналів та їхньому застосуванню в автоматизованих системах медичної діагностики. Проведено порівняльний аналіз методів класифікації патологічних станів, серед яких розглянуто нейронні мережі, метод опорних векторів та ансамблеві алгоритми.

Недостатньо дослідженими залишаються принципи побудови медичних кіберфізичних систем, які є одним з об'єктів вивчення та діяльності для спеціалістів комп'ютерної інженерії.

Другий розділ присвячено розробці та реалізації нових методів обробки медичних сигналів, зокрема із застосуванням технологій Інтернету речей (IoT) та конфігурованих апаратних рішень. У роботі досліджено методи управління походженням медичних даних і їхню інтеграцію в сучасні цифрові діагностичні системи. Запропоновано стандартизовані підходи до семантичного аналізу потоків даних, що підвищує їхню точність та відповідність вимогам сучасних медичних протоколів. Вирішена задача формування, збереження та обробки великих масивів медичних сигналів із дотриманням вимог до якості та точності аналізу. Значну увагу приділено можливостям підключення сенсорних систем до діагностичних комплексів та організації їх ефективної взаємодії.

Окремо досліджено використання FPGA-пристроїв для адаптивного управління сенсорною обробкою в реальному часі. Розроблено конфігуровані моделі підключення сенсорів, що дозволяють масштабувати систему залежно від вимог медичного моніторингу. Запропоновано методи автоматизованого налаштування параметрів обробки сигналів на апаратному рівні, що дозволяє забезпечити оптимальне використання обчислювальних ресурсів та підвищити ефективність діагностичних процедур. Окрему увагу приділено використанню вейвлет-фільтрації, зокрема вейвлетів Хаара, для цифрової обробки медичних сигналів. Виконано перетворення оригінальних рядів за допомогою вейвлетів із поділом на низькочастотні та високочастотні складові, що дозволило виділити значущі діагностичні ознаки. Розглянуто цифрові фільтри Хаара, які дозволяють адаптивно налаштовувати частотні характеристики сигналів, що підвищує точність виявлення патологій.

Третій розділ присвячений реалізації вдосконалених методів рекурентного аналізу, аналізу варіабельності та графіків Пуанкаре для обробки та візуалізації медичних сигналів. Досліджено ефективність рекурентних графіків для амбулаторного моніторингу артеріального тиску, що дозволило оптимізувати вибір параметрів аналізу та зменшити вплив шумів на 30%. Запропоновано нову методику аналізу сигналів амбулаторного моніторингу тиску крові (АМТК) з використанням зсуву вікна, що дозволяє виявляти циркадні коливання з

похибкою прогнозування менше ніж 2%. Розроблено метод оцінки графіків Пуанкаре на основі ентропії Шеннона, що дає можливість ідентифікувати перехідні стани фізіологічних процесів із точністю 92%. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих підходів у порівнянні з традиційними методами аналізу медичних сигналів.

У четвертому розділі присвячений дослідженню методів обробки рівня оксигенації крові пацієнтів, зокрема аналізу сигналів SpO_2 та SaO_2 . Запропоновано вдосконалений підхід до оцінки варіабельності SpO_2 шляхом використання міжквартильного діапазону (IQR), що забезпечує стійкість до викидів, допускаючи до 12% аномальних значень без спотворення оцінок. Реалізовано метод диференціального аналізу сигналів оксигенації, що враховує довжину інтервалів між перемиканнями рівня SaO_2 та їхній статистичний розподіл за законами Ерланга та Пуассона. Це дозволяє підвищити точність оцінки динаміки змін оксигенації на 18–25% та прогнозувати кількість перемикань рівня сатурації з похибкою не більше ніж 10%. Також встановлено негативну кореляцію ($-0,86$) між коефіцієнтом рекурентності (RR) та показниками варіабельності, що підтверджує доцільність використання рекурентного аналізу для оцінки стабільності кисневої сатурації.

У висновках підсумовано основні результати дослідження та окреслено можливі напрями подальшого розвитку методів цифрової обробки медичних сигналів. Запропоновані підходи продемонстрували результативність у задачах аналізу медичних даних, що вказує на доцільність їхнього впровадження в клінічну практику та системи медичного діагностування. Використання розроблених методів дозволяє підвищити точність діагностики, скоротити час обробки сигналів, що при однакових витратах на діагностику можна трактувати як підвищення її ефективності. Також використання розроблених методів дозволяє автоматизувати діагностику.

Список використаних джерел містить 178 найменувань. У Додатках наведено Акти впровадження та лист підтримки, програмний код формування та обробки датасету капілярної оксигенації крові, а також список опублікованих

наукових праць за темою дисертації.

3. Наукова новизна отриманих результатів

У результаті дисертаційного дослідження отримано такі результати, які мають наукову новизну:

- **вперше** запропоновано семантичну модель походження медичних даних (Data provenance), в якій IoT-пристрої, що надсилають інформацію з сенсорів до основної системи обробки, можна розглядати як основне джерело даних для контролю, що дозволяє отримувати верифіковані медичні дані пацієнтів у відповідності до онтологій та правил для їх обробки та візуалізації, використовуючи метод головних компонент, метод наближення до еліпсу, рекурентні графіки та графіки Пуанкаре, та надає можливість спеціалістам приймати клінічні рішення;

- **набули подальшого розвитку** метод рекурентного аналізу та обробки коротких серій медичних сигналів, що, на відміну від традиційних методів оцінки варіабельності за середніми значеннями, дозволяє ідентифікувати перехідні стани фізіологічних процесів із точністю 92 %, зменшити вплив шумів на 30 % та прогнозувати циркадні коливання із похибкою менше ніж 2 %;

- **удосконалено** метод оцінки варіабельності SpO_2 , зокрема шляхом застосування міжквартильного діапазону (IQR) як надійного статистичного показника, що демонструє більшу стійкість до викидів у порівнянні зі стандартним відхиленням, допускаючи до 12 % викидів без спотворення статистичних оцінок;

- **вперше** запропоновано метод диференціального аналізу сигналів оксигенації, який враховує довжину інтервалів між перемиканнями рівня SaO_2 та їхній статистичний розподіл за законами Ерланга та Пуассона, що, на відміну від традиційних методів аналізу середніх значень, дозволяє збільшити точність оцінки динаміки змін оксигенації на 18–25 % та прогнозувати кількість перемикань рівня сатурації з похибкою не більше ніж 10 %;

- **вперше** доведено фрактальну природу сигналів щодо оксигенації артеріальної крові і вказано одновимірний фрактал – часові позиції змін рівня

сатурації. — що в подальшому надає можливість зменшення частоти вимірів показників артеріальної крові максимум до $2^8 = 256$ разів без втрати їх точності.

4. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових результатів в опублікованих працях

Оформлення дисертації відповідає встановленим вимогам. Зміст, структура та послідовність викладення результатів відповідають як темі роботи, так і актуальним вимогам Міністерства освіти і науки України. Була проведена перевірка дисертації на наявність академічного плагіату. Результати свідчать про самостійне виконання науково-технічних досліджень. Дисертаційна робота написана державною мовою, матеріал викладено чітко, стиль викладення результатів досліджень, висновків і рекомендацій забезпечує їхнє нормальне сприйняття і використання. Тема роботи достатньо повно розкрита в 17 наукових публікаціях, внесених до Списку опублікованих наукових праць за темою дисертації (Додаток В), з них 4 статті у фахових наукових виданнях України категорії А, внесених до науко-метричної бази Scopus, 2 статті у в даних, які внесено до науко-метричної бази Scopus, 7 тез доповідей міжнародних науково-технічних конференцій, матеріали яких також внесено до науко-метричної бази Scopus.

5. Практичне значення одержаних результатів

У роботі вказано на таке практичне значення дисертаційного дослідження:

- впроваджено алгоритми цифрової фільтрації та аналізу медичних сигналів;
- розроблено метод повнохвильового випрямлення та згладжування ЕМГ-сигналів за допомогою рухомої медіани (ММ) та середньоквадратичного значення (RMS);
- впроваджено методи рекурентного аналізу та графіків Пуанкаре для оцінки варіабельності медичних сигналів;

- впроваджено нові інтегральні показники варіабельності рівня оксигенації артеріальної крові (SaO_2);
- впроваджено вдосконалені методи аналізу часових рядів для виявлення трендів та сезонних коливань медичних сигналів;
- впроваджено алгоритми аналізу головних компонент у структурі обробки медичних сигналів;
- впроваджено алгоритми цифрової фільтрації та аналізу медичних сигналів, що можуть бути інтегровані в автоматизовані діагностичні системи.

6. Зауваження щодо змісту дисертації

1. В Анотації до роботи, у Списку опублікованих наукових праць за темою дисертації та у Вступі вказано різні кількості (відповідно, 11, 13, 4, до того ж неправильні), публікацій автора, які внесено до науко-метричної бази Scopus. Насправді, до науко-метричної бази Scopus внесено 21 публікацію автора, усі публікації – за темою дисертації, їх процитовано 34 рази (індекс Хірша – 3).

2. Заявлене у назві роботи підвищення ефективності діагностичних систем показано у роботі непрямым способом через підвищення точності діагностики, скорочення часу обробки сигналів, автоматизацію діагностики, що при однакових витратах на діагностику можна трактувати як підвищення її ефективності.

3. Заявлені у назві роботи методи та засоби, а також практичне значення отриманих результатів не згадано у змісті роботи, у роботі немає чіткого переліку запропонованих автором засобів, запропоновані автором засоби не згадано у Висновках до роботи, не всі отримані результати підтверджено Актами впровадження.

4. У тексті невпорядковано використовуються близькі за значенням вирази, наприклад, семантична модель походження медичних даних - модель семантичної системи походження медичних даних, числовий критерій - критерій (2.10) - умова (2.10) - порівняння (2.10), що ускладнює оцінку наукової новизни отриманих автором результатів.

5. Наведені у формулюваннях наукової новизни кількісні параметри виводяться з наведених у роботі таблиць, графіків та отриманих під час виконання

роботи наборів даних (датасетів), але сам процес визначення цих кількісних параметрів описано в роботі недостатньо.

6. У підрозділі 1.2 роботи проведено аналіз наявних пропрієтарних систем комп'ютерної математики Maplesoft Maple, Matlab, Wolfram Mathematica, Microsoft Excel. На жаль, поза увагою залишилася вільна вітчизняна хмарна платформа MathPartner.

7. Аналіз стану питання та постановка задач дослідження зосереджено не тільки в Розділі 1, але цій тематиці присвячено значну частину інших розділів роботи. Тому важко визначити межу, яка розділяє внесок інших науковців від наукового внеску автора роботи

8. Формулу 2.1, першу формулу у Розділі 2, на яку спираються всі наступні дослідження у роботі, наведено з помилкою.

9. На початку назви Розділу 4 пропущено словосполучення «Впровадження та». У Розділі 4 пропущено інформацію про впровадження наукових результатів, яке підтверджено наведеними в роботі Актами впровадження.

Вищевказані зауваження та недоліки не є вирішальними, і хоча і впливають на загальне сприйняття проведених досліджень, але не зменшують загальну позитивну оцінку виконаної дисертаційної роботи, її наукову новизну та практичну значимість.

7. Загальний висновок.

Навіть з врахуванням наведених вище недоліків та зауважень представлена дисертація Дарнапука Євгена Сергійовича «Методи та засоби обробки медичних сигналів для підвищення ефективності діагностичних систем» є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить обґрунтовані наукові результати. Вирішено актуальну науково-прикладну задачу, яка полягає у розробленні та дослідженні комп'ютерних методів та засобів обробки медичних сигналів, що використовуються в складі діагностичних систем. Одержані наукові та практичні результати є вагомими для галузі інформаційних технологій у цілому та комп'ютерної інженерії зокрема. Тема, зміст дисертації та отримані наукові результати в цілому відповідають предметній області спеціальності 123 -

Комп'ютерна інженерія. Дисертаційна робота Дарнапука Євгена Сергійовича за структурою, обсягом, змістом, якістю викладу і оформлення в цілому відповідає вимогам Постанови «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішень разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження наукового ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а автор дисертації, Дарнапук Євген Сергійович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 - Комп'ютерна інженерія.

Офіційний опонент,

професор кафедри електронних обчислювальних машин

Національного університету «Львівська Політехніка»

д.т.н., професор

Валерій ГЛУХОВ

14.04.2025р.

Підпис Глухова В. С. засвідчую:

Вчений секретар

Національного університету «Львівська політехніка»

к.т.н., доцент



Роман БРИЛИНСЬКИЙ