

Вченої ради Чорноморського національного університету імені Петра Могили (протокол від 21 листопада 2024 р. № 10).

Науковим керівником затверджений д-р фіз.-мат. наук, проф. Чуйко Г. П.

2. Запитання до здобувача Дарнапука Є. С.

Запитання по темі дисертації ставили: д-р техн. наук, проф. Журавська І. М.; д-р техн. наук, проф. Нікольський В. В.; д-р техн. наук, проф. Трунов О. М.; д-р техн. наук, проф. Глухов В. С.; д-р техн. наук, проф. Козлов О. В.; канд. техн. наук, доц. Крайник Я. М.; канд. техн. наук, доц. Савінов В. Ю.; канд. техн. наук, доц. Топалов А. М.; канд. фіз.-мат. наук, доцент Пузирьов С. В.; ст. викладач Бурлаченко І. С.

3. Виступи за обговореною роботою Дарнапука Є. С.

В обговоренні дисертації взяли участь: д-р фіз.-мат. наук, проф. Чуйко Г. П.; д-р техн. наук, проф. Журавська І. М.; д-р техн. наук, проф. Нікольський В. В.; д-р техн. наук, проф. Трунов О. М.; д-р техн. наук, проф. Глухов В. С.; канд. техн. наук, доц. Крайник Я. М.; канд. техн. наук, доц. Савінов В. Ю.; канд. техн. наук, доц. Топалов А. М.; канд. фіз.-мат. наук, доцент Пузирьов С. В.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів дисертації
Дарнапука Євгена Сергійовича на тему
«Методи та засоби обробки медичних сигналів для підвищення ефективності
діагностичних систем»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія
з галузі знань 12 Інформаційні технології

Наукова новизна отриманих результатів

Ознайомлення зі змістом дисертації та основними публікаціями, а також за результатами фахового семінару дозволяє дійти висновку, що основна мета дослідження полягає в створенні нових та вдосконаленні існуючих методів, алгоритмів та засобів обробки найбільш уживаних в діагностиці медичних сигналів, таких як електроміограми, рівень сатурації крові киснем та інших що спрямовані на підтримку та підвищення якості клінічних рішень. Це знайшло відображення в основних положеннях роботи, які сформульовані автором особисто та містять наукову новизну.

Наукова новизна отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає у наступному:

– *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 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 надавати клінічні рішення;

– *вперше* доведена фрактальна природа 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;

– *набув 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 SpO₂, 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.

Наукова новизна отриманих у дисертаційній роботі результатів, сформульованих висновків і наданих рекомендацій є очевидною та свідчить про досягнення поставленої у роботі мети. Результати також характеризуються оригінальним авторським підходом до вирішення поставленого науково-практичного завдання. Основні наукові результати отримані особисто здобувачем.

Репрезентативність результатів досліджень

Достовірність отриманих результатів обумовлена коректною постановкою задач дослідження, використанням сучасних методів математичного аналізу, а також числовою та експериментальною перевіркою отриманих моделей. У роботі застосовано математичний апарат цифрової обробки сигналів, методи рекурентного аналізу, статистичного моделювання, кластеризації даних, машинного навчання, а також вейвлет-фільтрації. Для дослідження варіабельності фізіологічних сигналів використано теорію часових рядів, методи нелінійної динаміки та адаптивної оцінки параметрів, що забезпечило високу точність і надійність отриманих результатів.

Об'єктивною формою підтвердження обґрунтованості та адекватності основних положень дисертації є апробація запропонованих методів на реальних наборах медичних даних, отриманих у ході експериментальних досліджень, а також їхнє впровадження у навчальний процес Чорноморського національного університету імені Петра Могили. Проведено серію експериментів для оцінки ефективності алгоритмів цифрової фільтрації, аналізу варіабельності та методів

класифікації пацієнтів за рівнем кисневої сатурації. Отримані результати підтверджено статистичними розрахунками, що демонструють високу кореляцію між розробленими методами та традиційними підходами до аналізу медичних сигналів.

Практичне використання результатів дослідження забезпечується можливістю їхньої інтеграції у системи автоматизованого моніторингу здоров'я, IoT-пристрої для віддаленого контролю пацієнтів, портативні діагностичні комплекси та сучасні медичні інформаційні системи. Отримані висновки можуть бути використані у майбутніх дослідженнях для подальшої оптимізації методів аналізу медичних сигналів, що відкриває перспективи для їхнього застосування в персоналізованій медицині та інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень.

Теоретичне і практичне значення одержаних результатів

– *впроваджено* алгоритми цифрової фільтрації та аналізу медичних сигналів, що дозволяє підвищити точність виявлення аномалій у фізіологічних даних та покращити якість автоматизованих діагностичних систем;

– *розроблено* метод повнохвильового випрямлення та згладжування ЕМГ-сигналів за допомогою рухомої медіани (ММ) та середньоквадратичного значення (RMS), що дозволяє ефективно відокремлювати корисний сигнал від шуму в умовах значної кількості викидів;

– *впроваджено* методи рекурентного аналізу та графіків Пуанкаре для оцінки варіабельності медичних сигналів, що дозволяє ідентифікувати характерні патерни змін у даних та використовувати їх для персоналізованого моніторингу пацієнтів;

– *впроваджено* нові інтегральні показники варіабельності рівня оксигенації артеріальної крові (SaO_2), що забезпечує більш інформативний аналіз стану пацієнтів у порівнянні з традиційними статистичними методами;

– *впроваджено* методи аналізу часових рядів для виявлення трендів та сезонних коливань медичних сигналів, що сприяє покращенню діагностики захворювань, пов'язаних з порушенням фізіологічних ритмів.

– *впроваджено* алгоритми аналізу головних компонент у структурі обробки медичних сигналів, що сприяє виявленню основних факторів, які впливають на зміну фізіологічних параметрів.

– *впроваджено* алгоритми цифрової фільтрації та аналізу медичних сигналів, що можуть бути інтегровані в автоматизовані системи медичного моніторингу. Використання вейвлет-фільтрації Хаара дозволяє ефективно очищати медичні сигнали від шумів, що покращує якість їхньої подальшої обробки. Запропоновані методи можуть бути застосовані для аналізу електроміограм (ЕМГ), добового моніторингу артеріального тиску (АМТК), варіабельності серцевого ритму (HRV) та інших фізіологічних показників.

Результати дисертаційної роботи мають суттєве практичне значення в галузі автоматизованих систем обробки медичних сигналів, аналізу медичних даних, персоналізованої медицини та стандартизації методів оцінки фізіологічних параметрів. Запропоновані методи можуть бути використані в клінічній

діагностиці, наукових дослідженнях, розробці інтелектуальних медичних систем та навчанні спеціалістів з комп'ютерної інженерії.

Дисертаційна робота виконана відповідно до напрямку наукових досліджень кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили (надалі – ЧНУ ім. 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. У рамках співпраці, німецькою ІТ-компанією «Viene IT GmbH» запропоновано підтримку щодо доступу до ресурсів, а саме надана допомога в перевірці та практичному застосуванні результатів у реальних медичних закладах, включаючи інтеграцію в сучасні медичні пристрої моніторингу (Лист підтримки від Patrick Bienert, General-Manager). 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.).

Оцінка основного змісту дисертації та її структури

Дисертація є завершеною науковою працею. Стиль і мова викладення матеріалу в тексті дисертаційної роботи цілком відповідають існуючим вимогам викладення науково-технічної інформації. Робота написана грамотною науково-технічною мовою із використанням загальноприйнятої термінології та за своїм змістом і формою повністю відповідає вимогам пп. 8–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (у редакції від 08.05.2024).

Структурно робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Обсяг загального тексту дисертації складає 173 сторінки, з них основного тексту 159 сторінок, ілюстровані 41 рисунком та 11 таблицями. **Перший розділ** містить аналіз сучасного стану розвитку методів обробки медичних сигналів та систем медичного моніторингу. У ньому розглянуто особливості роботи з електрокардіограмами (ЕКГ), електроміограмами (ЕМГ) та рівнем кисневої сатурації (SpO_2 , SaO_2), а також основні методи їхньої цифрової обробки. Проаналізовано існуючі підходи до фільтрації шумів, оцінки варіабельності сигналів, використання статистичних методів та алгоритмів машинного навчання для медичних досліджень. Okремо розглянуто питання автоматизації аналізу фізіологічних параметрів та інтеграції сучасних технологій у системи дистанційного медичного моніторингу. Визначено ключові проблеми, які існують у цій галузі, та сформульовано наукові завдання, що вирішуються у роботі. **Другий розділ** присвячений розробці методів цифрової фільтрації та оптимізації параметрів обробки медичних сигналів. Запропоновано використання вейвлет-

фільтрації Хаара для очищення сигналів від шумів та підвищення точності їхньої подальшої обробки. Наведено математичне обґрунтування вибору фільтрів та їхніх параметрів, а також експериментальні результати, що підтверджують ефективність запропонованих методів. У розділі розглянуто різні підходи до попередньої обробки сигналів, зокрема методи нормалізації, згладжування та усереднення. Проведено порівняння ефективності традиційних методів обробки із запропонованими вдосконаленими алгоритмами. **Третій розділ** зосереджений на аналізі варіабельності медичних сигналів та їхньої математичної обробки. У ньому досліджено графіки Пуанкаре та методи рекурентного аналізу, які використовуються для оцінки стабільності та виявлення аномальних змін у фізіологічних процесах. Розглянуто методіку кластеризації фізіологічних сигналів, що дозволяє виокремити групи пацієнтів із різними рівнями стабільності їхніх параметрів. Запропоновано нові підходи до кількісного оцінювання повторюваності сигналів та їхньої варіабельності, що є важливим для моніторингу серцево-судинних та респіраторних показників. Проведено серію експериментів, що підтверджують ефективність використання запропонованих методів у реальних діагностичних системах. **Четвертий розділ** присвячений статистичному аналізу рівня кисневої сатурації (SpO_2) та застосуванню методів рекурентного аналізу для оцінки варіабельності цих показників. У ньому запропоновано кластеризацію пацієнтів за рівнем варіабельності сатурації та встановлено зв'язок між варіабельністю SpO_2 та коефіцієнтом рекурентності. Доведено, що середній рівень RR у пацієнтів із найменш варіабельною сатурацією втричі перевищує значення цього коефіцієнта для підгрупи з найвищою варіабельністю. Наведено методи аналізу динаміки змін рівня SpO_2 у пацієнтів з метою виявлення потенційних ризиків для здоров'я, зокрема при захворюваннях дихальної системи. Оцінено ефективність використання графіків Пуанкаре для моніторингу стану пацієнтів із респіраторними порушеннями. Запропоновані підходи можуть бути використані в автоматизованих системах медичного моніторингу для персоналізованого оцінювання змін фізіологічних параметрів. **Висновки** сформовані коректно. Список використаних джерел містить 178 найменувань. В додатках містяться документи про впровадження наукових розробок здобувача, програмний код формування та обробки датасету капілярної оксигенації крові, список опублікованих праць.

Аналіз публікацій

За результатами досліджень опубліковано 17 наукових праць, у тому числі 4 статті у двох наукових фахових виданнях України категорії А, що індексуються в наукометричній базі Scopus (одне видання відносяться до третього квартилю відповідно до рейтингу Scimago Journal Rank, друге видання – до Q2). Результати апробації дисертації опубліковано у 7 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій, які індексуються в наукометричній базі Scopus. Додатково наукові результати дисертації відображено у розділах 3 колективних монографій (дві з них англійською мовою), 1 статті в зарубіжному періодичному науковому виданні; 3 колективні монографії, 1 навчальному посібнику та 1 датасеті у репозиторії Mendeley Data.

Особиста участь автора в отриманні наукових та практичних результатів, що викладені в дисертаційній роботі, полягає у наступному: проведено комплексний аналіз сучасних методів цифрової обробки медичних сигналів та їхнього застосування в діагностичних системах; досліджено ефективність різних методів фільтрації сигналів, зокрема вейвлет-фільтрації Хаара, для усунення шумових компонент; запропоновано нові підходи до аналізу варіабельності медичних сигналів за допомогою рекурентного аналізу та графіків Пуанкаре; розроблено та реалізовано алгоритм класифікації пацієнтів за рівнем варіабельності кисневої сатурації на основі статистичних показників та коефіцієнта рекурентності; проведено числове моделювання та оцінку впливу параметрів сигналів на їхню стабільність, що дозволило відокремити статистично значущі патерни варіабельності SpO₂; здійснено експериментальну апробацію розроблених методів на сформованому датасеті, що підтвердило їхню ефективність.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Дарнапука Євгена Сергійовича є завершеним науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати, що є суттєвим для створення моделей та інформаційних технологій для підвищення якості процесу прийняття рішень в задачах вибору припустимих за оптимальністю організаційних структур великих наукомістких підприємств. Зміст дисертації відповідає визначеній меті, поставлені здобувачем наукові завдання вирішені, і, таким чином, мету дослідження досягнуто. Основні положення дисертації, що задекларовані здобувачем, містять елементи наукової новизни, рівень яких визначено коректно. Робота відповідає стандарту спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія та вимогам до рівня наукової кваліфікації здобувача.

Публікації та апробації повністю відображають результати дисертації, а особистий внесок здобувача до наукових публікацій, що підготовлені в співавторстві відображені коректно та можуть бути зараховані за темою дисертації. Наукові положення, висновки та рекомендації обґрунтовані, містять пункти наукової новизни та пройшли необхідну апробацію на науково-практичних конференціях.

Дисертація за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України, а саме: постанові Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (у редакції від 08.05.2024); наказу Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (у редакції від 12.07.2019).

З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Дарнапука Євгена Сергійовича дисертаційна робота на тему «Методи та засоби обробки медичних

сигналів для підвищення ефективності діагностичних систем» рекомендується для подання до розгляду та захисту на Вченій раді ЧНУ ім. Петра Могили.

УХВАЛИЛИ:

1. Затвердити Висновок про наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів дисертації **Дарнапука Євгена Сергійовича** на тему **«Методи та засоби обробки медичних сигналів для підвищення ефективності діагностичних систем»**.

2. Рекомендувати дисертаційну роботу **«Методи та засоби обробки медичних сигналів для підвищення ефективності діагностичних систем»**, подану **Дарнапуком Євгеном Сергійовичем** на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія галузі знань 12 Інформаційні технології, до захисту у разовій спеціалізованій вченій раді.

3. Запропонувати Вченій раді ЧНУ ім. Петра Могили включити до складу разової спеціалізованої вченої ради с правом прийняття до розгляду та проведення захисту дисертації нижчезазначені кандидатури:

Голова Ради: ТРУНОВ Олександр Миколайович, д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій Чорноморського національного університету імені Петра Могили (м. Миколаїв)

Рецензент: ЖУРАВСЬКА Ірина Миколаївна, д-р техн. наук, професор, завідувачка кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили (м. Миколаїв)

Рецензент: САВІНОВ Володимир Юрійович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили (м. Миколаїв)

Опонент: ГЛУХОВ Валерій Сергійович, д-р техн. наук, професор, професор кафедри електронних обчислюваних машин Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів)

Опонент: ТОПАЛОВ Андрій Миколайович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв)

Результати голосування присутніх на засіданні докторів наук та кандидатів наук:

– всього: «За» – 11, «Проти» – 0, «Утрималось» – 0.

Головуючий на засіданні
професор кафедри комп'ютерної інженерії,
д-р техн. наук зі спец. 05.13.05, професор

Віталій НІКОЛЬСЬКИЙ

Секретар засідання
доцент кафедри комп'ютерної інженерії,
канд. фіз.-мат. наук, доцент

Сергій ПУЗИРЬОВ