

ВІДГУК

на дисертаційну роботу
Дарнапука Євгена Сергійовича

на тему «Методи та засоби обробки медичних сигналів для підвищення
ефективності діагностичних систем»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 12 Інформаційні технології
за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

Актуальність теми дисертації.

Сучасні діагностичні системи відіграють ключову роль у контролі стану здоров'я пацієнтів та ранньому виявленні патологічних змін. Однак ефективність цих систем значною мірою залежить від якості цифрової обробки отриманих медичних сигналів, які можуть містити значні рівні шуму, артефакти та нерівномірності у часових рядах. Традиційні методи аналізу медичних сигналів, такі як спектральний аналіз або статистичні підходи, часто виявляються недостатньо гнучкими для обробки складних фізіологічних даних, що містять нелінійні або хаотичні компоненти. У сучасних умовах зростає потреба у вдосконаленні методів обробки одновимірних фізіологічних сигналів, таких як електроміограми (ЕМГ), сигнали сатурації крові киснем (SpO_2), варіабельність серцевого ритму (HRV) тощо. Використання новітніх підходів, зокрема вейвлет-фільтрації, методів рекурентного аналізу, цифрових алгоритмів згладжування та адаптивних методів фільтрації, дозволяє значно покращити якість сигналів, підвищити точність діагностики та ефективність роботи систем медичного моніторингу.

Додатково, швидкий розвиток Інтернету речей (IoT) у сфері медицини відкриває нові можливості для збору та обробки даних у реальному часі. Проте інтеграція великих масивів медичних сигналів в існуючі діагностичні системи потребує розробки стандартизованих підходів до їх обробки та класифікації. У цьому контексті актуальною є розробка нових алгоритмів цифрової фільтрації, методів статистичного аналізу та моделей оцінки варіабельності фізіологічних параметрів для забезпечення стабільної роботи автоматизованих діагностичних комплексів.

Традиційні методи цифрової обробки сигналів не завжди враховують динамічну змінність та складність фізіологічних процесів, що зменшує їхню ефективність у визначенні довготривалих трендів та короткочасних відхилень. Використання методів рекурентного аналізу, графіків Пуанкаре, сингулярного спектрального аналізу та фрактальних методів дозволяє отримати додаткову

інформацію про стан пацієнта та підвищити точність автоматизованої діагностики.

Таким чином, удосконалення методів обробки медичних сигналів, зокрема шляхом застосування нових статистичних підходів, машинного навчання, рекурентного аналізу та цифрових методів фільтрації, є актуальним науково-практичним завданням. Запропоновані в дисертаційному дослідженні методи та засоби цифрової обробки медичних сигналів мають велике значення для підвищення ефективності діагностичних систем, зменшення ризику помилкових діагнозів та розширення можливостей автоматизованого медичного моніторингу.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. **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;

2. **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 %;

3. **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;

4. **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 %;

5. **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.

Наукові положення, викладені в дисертаційній роботі є достатньо обґрунтованими, а отримані результати узгоджуються з вже відомими та є їх подальшим розвитком. Здобувач здійснив глибокий аналіз та систематизацію наукових результатів, використовуючи ретельно обґрунтовані методи дослідження. Достовірність отриманих результатів підкріплюється моделюванням та експериментальними дослідженнями.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Дарнапука Є. С. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Інформаційні технології».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Дарнапука Євгена Сергійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Результати досліджень викладені послідовно та лаконічно, що дозволяє читачеві легко розібратися у методології та отриманих висновках. Автор використовує доступний стиль мовлення, що сприяє зрозумінню матеріалу. Використання загальноприйнятої термінології забезпечує консистентність і точність викладення інформації, що є важливим фактором для наукових досліджень.

У вступі розкрито актуальність теми дослідження, приведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведено мету і завдання дослідження, методи дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації, кількість публікацій та обсяг роботи, що відповідає загальноприйнятій структурі дисертаційної роботи.

Скорочений опис розділів дисертації

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.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 17 наукових публікаціях, з них 4 статті – у наукових фахових виданнях України кат. А, які також проіндексовані у наукометричній базі Scopus та видання яких віднесені до першого-третього квартилів (Q1-Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank; 7 праць – у збірниках матеріалів міжнародних науково-практичних конференцій, проіндексованих у наукометричній базі Scopus. Додатково відображають наукові результати дисертації 1 стаття – в зарубіжному періодичному науковому виданні; 3 колективні монографії (дві з них англійською мовою), 1 навчальний посібник та 1 датасет у репозиторії Mendeley Data.

Здобувач продемонстрував високий науковий рівень у своїх публікаціях, який відображається в їхній актуальності, методичності та оригінальності про що свідчить наявність трьох наукових статей у виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus. Здобувач дотримувався принципів академічної доброчесності, представляючи результати своїх досліджень з чітким викладом джерел та відсутністю плагіату.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У роботі здобувачем представлено математичне моделювання варіабельності медичних сигналів, однак відсутні експериментальні результати, отримані в клінічних умовах на реальних пацієнтах. Це може ускладнювати оцінку практичної значущості запропонованих методів. Доцільно було б доповнити дослідження аналізом даних від незалежних медичних установ або порівнянням із результатами, отриманими іншими алгоритмами на реальних вибірках

2. У роботі розглянуто використання FPGA для обробки медичних сигналів, однак недостатньо висвітлено питання інтеграції алгоритмів у реальні системи моніторингу здоров'я. Необхідно було б детальніше проаналізувати можливість реалізації запропонованих методів у медичних пристроях реального часу та оцінити їхню ефективність у порівнянні з існуючими системами.

3. У дисертації розглядаються методи фільтрації медичних сигналів, зокрема вейвлет-фільтрація, однак недостатньо уваги приділено питанням компенсації артефактів, спричинених руховою активністю пацієнтів. Особливо це стосується аналізу рівня оксигенації крові, де значні артефакти можуть впливати на точність діагностичних висновків.

4. Використання методу сингулярних чисел та фрактального аналізу дозволяє отримати складні характеристики варіабельності сигналів, однак їхня інтерпретація для лікарів-клініцистів залишається неочевидною. Важливо було б запропонувати більш інтуїтивні метрики або методи візуалізації для спрощення аналізу результатів у реальній медичній практиці.

5. Розроблення методу повнохвильового випрямлення та згладжування ЕМГ-сигналів вказано як результат, що має практичне значення, але оскільки це розроблений метод, то його необхідно було віднести до переліку методів, що мають наукову новизну.

6. В тексті роботи використовуються новоутворені вирази, наприклад, «дворазова децимація («ліниве вейвлет-перетворення»)» (с. 77) без пояснень необхідності такого новоутворення.

Підводячи підсумок критичного розгляду матеріалів дисертаційної роботи, зазначу, що більшість зауважень, як видно із відгуку, торкається формальної чи технічної сторони оформлення роботи. Решта були сформульовані з метою поглиблення уяви здобувача про сутність фізичних процесів та звернення уваги на певні особливості обраної сфери дослідження.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Дарнапука Євгена Сергійовича на тему «Методи та засоби обробки медичних сигналів для підвищення ефективності діагностичних систем» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для комп'ютерної інженерії. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 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.

Здобувач Дарнапук Євген Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Офіційний опонент:

доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, кандидат технічних наук, доцент



Андрій ТОПАЛОВ