Голові разової спеціалізованої вченої ради
Державного університету
«Житомирська політехніка»
доктору технічних наук, професору
ЖУРАВСЬКОМУ Ю.В.

ВІДГУК
офіційного опонента
кандидата технічних наук, доцента, завідувача кафедри біотехнічних систем
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя
ЯВОРСЬКОЇ Євгенії Богданівни
на дисертаційну роботу

МАЦІЄВСЬКОГО Вадима Анатолійовича
на тему **«Модель, методи, алгоритми та програмне забезпечення опрацювання результатів біомедичних показників»**,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 12 – Інформаційні технології
за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення

Актуальність теми дисертації.

Дисертаційне дослідження Мацієвського Вадима Анатолійовича присвячене вирішенню актуальної науково-прикладної задачі розроблення моделі, методів, алгоритмів та програмного забезпечення опрацювання результатів біомедичних показників у розподілених програмних комплексах, побудованих на архітектурах Інтернету медичних речей (IoMT). Такі комплекси агрегують дані різнотипних джерел – носимих сенсорів, приліжкових моніторів, електронних медичних записів і відкритих наборів даних, – кожне з яких має власні частоту дискретизації, розрядність аналого-цифрового перетворення та рівень завад. Унаслідок цього зведений набір даних містить систематичні апаратні зміщення, які не мають фізіологічної природи, проте сприймаються аналітичними моделями як діагностично значущі ознаки, що безпосередньо впливає на достовірність предиктивного висновку.

Актуальність теми підтверджується не лише академічним інтересом до методів нелінійного аналізу біосигналів, гармонізації гетерогенних даних та пояснюваного штучного інтелекту, а й практичними потребами закладів охорони здоров’я та розробників медичних інформаційних систем. Здобувач слушно зазначає, що дотримання протоколів інтероперабельності (HL7 FHIR, DICOM)

забезпечує лише синтаксичну сумісність джерел, але не гарантує статистичної однорідності даних, а в наявних IoMT-платформах компенсація міжджерельних розбіжностей виконується всередині навченої моделі й тому не піддається незалежній перевірці та обмежує повторне застосування моделі з іншим набором сенсорів. Додатково обмеженість обчислювальних ресурсів периферійного рівня та нормативні вимоги до трасовності рішень інтелектуальних компонентів медичного програмного забезпечення формують потребу в обчислювально ефективних та інтерпретованих рішеннях. Дисертація пропонує теоретично обґрунтований і програмно реалізований підхід, що поєднує геометричні інваріанти фазового портрета біосигналу, винесену в окремий детермінований етап конвеєра байєсівську корекцію джерел даних та гібридну підсистему підтримки прийняття клінічних рішень.

Дисертаційне дослідження виконано відповідно до планів науково-дослідних робіт факультету інформаційно-комп'ютерних технологій Державного університету «Житомирська політехніка», зокрема в межах тем з державними реєстраційними номерами 0121U113293 та 0122U000973.

Таким чином, тема дисертаційної роботи є науково обґрунтованою, своєчасною та відповідає потребам розвитку інженерії програмного забезпечення як галузі знань.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Аналіз змісту дисертаційної роботи та наукових публікацій здобувача засвідчує, що основні наукові положення, висновки та рекомендації обґрунтовані належним чином. Здобувач демонструє впевнене володіння сучасним науковим апаратом у сфері цифрової обробки біосигналів, теорії динамічних систем, машинного навчання, а також мікросервісного проєктування та верифікації програмного забезпечення.

Структура дисертації є логічно послідовною: від аналізу системних викликів проєктування IoMT-комплексів та порівняльного аналізу методів обробки біосигналів і алгоритмів інтелектуальної діагностики – через розроблення методів первинної обробки даних, формування простору ознак на основі фазового портрета біосигналу, інтелектуального алгоритму діагностики та узагальненої моделі апаратно-інваріантного конвеєра – до програмної реалізації платформи та експериментальної перевірки запропонованих рішень. Мета роботи, сформульовані п'ять завдань, об'єкт і предмет дослідження узгоджені між собою, а кожне завдання знаходить відображення у відповідному підрозділі та в загальних висновках.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у наступному:

вперше: - розроблено метод формування простору ознак предиктивних програмних компонентів біомедичного моніторингу, який, на відміну від відомих методів екстракції ознак на основі часового та частотного аналізу, ґрунтується на обчисленні геометричних інваріантів фазового портрета біосигналу, що забезпечує стійкість ознак до коливань частоти дискретизації та апаратних збоїв сенсорів;

- запропоновано модель інваріантного конвеєра опрацювання біомедичних показників, яка, на відміну від відомих моделей IoMT-платформ, де компенсація розбіжностей джерел даних виконується всередині навченої класифікаційної моделі, реалізує цю компенсацію окремим детермінованим етапом конвеєра;

- запропоновано метод автоматичного вибору тракту реконструкції фазового простору біосигналу за морфологічним критерієм у реальному часі, який, на відміну від відомого вибору методу реконструкції за апріорним типом сигналу, забезпечує узагальнюваність підходу на довільний квазіперіодичний біосигнал;

- запропоновано метод ентропійної оцінки заповнення фазової площини шляхом нормування ентропії розподілу точок стану на максимальну ентропію сітки, який, на відміну від існуючих, забезпечує обмеженість метрики діапазоном [0; 1] та стійкість ознаки до пропусків у потоці даних;

удосконалено: - алгоритмічну логіку конвеєра трансформації даних у складі програмних сервісів забезпечення інтероперабельності гетерогенних медичних даних шляхом виділення баєсівської корекції джерел в окремий мікросервіс етапу первинної обробки данних;

- розрахунок фазового коефіцієнту варіації форми як застосування класичного коефіцієнта варіації до радіус-векторів фазової траєкторії відносно центроїда, що дозволяє виявляти мікроаритмії та нестаціонарні перешкоди безпосередньо в процесі потокової обробки сигналу.

набули подальшого розвитку: архітектурно-алгоритмічні рішення підсистеми підтримки прийняття клінічних рішень шляхом гібридизації предиктивних векторів рекурентної нейромережі та детермінованих продукційних експертних правил над розробленими фазовими критеріями, що забезпечило верифікованість та прозорість висновків; підходи до розподілу обчислювального навантаження у розподілених програмних комплексах охорони здоров’я за рахунок винесення цифрової смугової фільтрації та поциклової сегментації сигналів на периферійний рівень.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

- розроблено програмні алгоритми обчислення запропонованих фазових критеріїв, які функціонують у режимі потокової обробки;

- реалізовано хмарний мікросервіс предиктивного аналізу та декларативну базу знань діагностичної системи на основі продукційних експертних правил, що забезпечує інтерпретованість висновків штучного інтелекту;

- реалізовано програмне забезпечення обробки біомедичних показників та проведено серію експериментів, що дозволило підтвердити здатність апаратно-інваріантної системи компенсувати апаратну розбіжність джерел даних при підключенні різнорідних сенсорів та публічних наборів даних, коректно усувати спотворення фазових критеріїв на етапі попередньої обробки сигналу та функціонувати в режимі потокової обробки, придатному для застосування в реальному часі.

Достовірність результатів забезпечується коректним використанням теорії динамічних систем і теореми Такенса, апарату логіки предикатів першого порядку, емпіричного байєсівського підходу та методів багатомірної імпутації; аналітичним обґрунтуванням обчислювальної складності O(N) розроблених критеріїв, підтвердженим профілюванням (R^2 = 0,981); автоматизованим тестуванням програмної реалізації (67 із 67 тестів, покриття коду понад 97 %, покриття бази продукційних правил за критерієм MC/DC); статистичною перевіркою результатів із застосуванням критерію Вілкоксона, бутстреп-оцінок довірчих інтервалів та розбиття вибірки за пацієнтами. Позитивно слід оцінити й те, що здобувач чітко окреслює межі отриманих результатів, зокрема зазначає, що оцінку діагностичної цінності фазових критеріїв виконано на синтетичній вибірці і вона потребує подальшої перевірки на клінічно розмічених даних.

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

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення в частині розроблення моделей, методів, алгоритмів та програмних засобів опрацювання даних, проєктування архітектури розподілених програмних систем та верифікації їх програмних компонентів. Зміст роботи узгоджений із задекларованою метою та завданнями, кожен розділ завершується обґрунтованими висновками, що систематизують отримані результати. Практичне значення результатів підтверджено довідками про впровадження ТОВ «Медичний центр Асклепій Плюс», КУ «Обласна клінічна лікарня ім. О. Ф. Гербачевського» Житомирської обласної ради та Державного університету «Житомирська політехніка».

Дисертаційна робота є самостійним, завершеним науковим дослідженням та свідчить про наявність власного наукового внеску здобувача у розвиток методів і програмних засобів опрацювання гетерогенних біомедичних даних. Особистий внесок здобувача в публікаціях, підготовлених у співавторстві, чітко визначено у вступі. Здобувач відкрито зазначає, що технології штучного інтелекту використовувались лише як допоміжний інструмент візуалізації окремих схем за власним описом і не застосовувались для генерування тексту чи формулювання наукових результатів, що відповідає сучасним вимогам прозорості наукової діяльності. Ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації в роботі не виявлено.

Посилання на першоджерела є коректними і охоплюють актуальний масив вітчизняних та зарубіжних публікацій (153 найменування, з них 143 – іноземною мовою), зокрема класичні праці Ф. Такенса, А. Фрейзера та Г. Свінні, М. Кеннела, В. Джонсона, С. ван Бюрена, К. Рудін. Всі запозичені ідеї та методи атрибутовані належним чином.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертація написана українською мовою з дотриманням норм наукового стилю. Термінологічний апарат узгоджений і відповідає сучасним стандартам у галузі інженерії програмного забезпечення, цифрової обробки сигналів та медичної інформатики. Ілюстративний матеріал – таблиці, графіки, блок-схеми алгоритмів, архітектурні діаграми – виконано якісно, і він органічно вписується в логіку викладення.

Дисертація має класичну структуру: анотація, вступ, три розділи, висновки, список використаних джерел та 5 додатків. У вступі чітко сформульовано актуальність, мету, об’єкт, предмет і завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення результатів.

У першому розділі виконано аналіз системних викликів та архітектурних бар’єрів проєктування програмних комплексів опрацювання біомедичних показників у розподілених середовищах IoMT, розглянуто нормативну базу та проаналізовано комерційні й відкриті платформи. Проведено класифікацію та порівняльний аналіз лінійних, часово-частотних, нелінійних методів та методів фазового простору за обчислювальною складністю і здатністю виявляти нелінійну динаміку, а також огляд алгоритмів інтелектуальної діагностики. Обґрунтовано, що методи фазового простору займають проміжну нішу, зберігаючи лінійну складність, але потребують кількісних критеріїв, придатних до автоматичної програмної інтерпретації.

У другому розділі здобувач розробив алгоритмічну логіку етапу первинної обробки даних у складі ETL-процесу на основі байєсівської корекції джерел (ComBat) та багатомірної імпутації пропущених значень (MICE). Формалізовано дискретне відображення часових рядів у фазовий простір, запропоновано критерії IDA, NFD та FCV і обґрунтовано їх обчислювальну складність. Розроблено інтелектуальний алгоритм діагностики шляхом гібридизації рекурентної мережі LSTM та бази продукційних правил і доведено повноту, несуперечливість та детермінованість цієї бази. Синтезовано узагальнену модель апаратно-інваріантного конвеєра «периферійний денойзинг → корекція джерела → геометричні інваріанти → предиктор → предикатний фільтр» з формалізованим критерієм розширюваності та протоколом підключення нового джерела.

У третьому розділі обґрунтовано вибір технологічного стеку та мікросервісної (гексагональної) архітектури, спроєктовано архітектуру платформи на трьох рівнях деталізації, подано алгоритми у вигляді блок-схем та виконано програмну реалізацію конвеєра трансформації даних, підсистеми предиктивного аналізу і підсистеми візуалізації. Сформовано експериментальну базу з джерел, що різняться апаратними характеристиками, і проведено серію експериментів, якими підтверджено перевагу критерію IDA над інтегральною площею атрактора за стійкістю до частоти дискретизації (у 3,3 раза), здатність корекції ComBat усувати близько 77 % деградації якості класифікації при підключенні нового джерела, ефективність адаптивного денойзингу та лінійну обчислювальну складність конвеєра із сумарною медіанною латентністю близько 4,86 мс.

Оформлення дисертаційної роботи загалом відповідає вимогам наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 12 наукових працях здобувача, серед яких: 2 публікації у виданнях, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus, 2 статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б» та 8 публікацій у матеріалах наукових конференцій (з них 3 – у зарубіжних виданнях).

Тематика публікацій охоплює всі ключові аспекти дисертації: системний аналіз підходів інженерії програмного забезпечення для інтелектуального опрацювання біомедичних показників, алгоритмічну корекцію «ефекту батчу» в ETL-конвеєрі, архітектуру гібридної біомедичної сенсорної мережі та оптико-електронної системи аналізу пульсових сигналів, методологію побудови

платформи опрацювання та прогнозування результатів біомедичних показників. Результати роботи пройшли апробацію на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях. Кількість та якість публікацій відповідають вимогам до оприлюднення результатів дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи:

1. Експериментальну перевірку запропонованих рішень, як зазначає сам автор, виконано переважно на синтетичних сигналах із контрольованими параметрами, тоді як у роботі описано й реальні відкриті набори даних (MIT-BIH Arrhythmia, MIMIC-III, PPG-DaLiA, BIDMC). Використання синтетичних сигналів є методично виправданим на етапі верифікації, оскільки дає змогу ізольовано оцінити вплив частоти дискретизації, рівня завад і втрат пакетів на розроблені критерії. Проте в дисертації бракує результатів, отриманих на зазначених реальних наборах даних, що суттєво підсилило б обґрунтованість висновків щодо практичної застосовності запропонованих рішень.

2. Для нормування координат фазової площини у формулі (2.6) застосовано min-max нормування, яке є чутливим до поодиноких імпульсних артефактів, характерних для носимих сенсорів. У роботі доцільно було б обґрунтувати вибір саме цього способу нормування порівняно з робастними підходами (наприклад, нормуванням за процентилями) та пояснити, яким чином такі артефакти усуваються на попередніх етапах конвеєра.

3. У роботі недостатньо обґрунтовано вибір значення допуску $\varepsilon = 0{,}03$ у критерії апаратної інваріантності (2.19), а також топології рекурентної мережі LSTM. Не зрозуміло чи виконувався підбір цих параметрів і наскільки отримані результати чутливі до їх зміни.

4. Частину показників профілювання обчислювального ядра отримано в хмарному середовищі розробки, а розгортання на цільовому периферійному пристрої (класу Raspberry Pi) віднесено до напрямів подальших досліджень. Роботу доповнила б хоча б орієнтовна оцінка латентності, споживання пам’яті та енергоспоживання на периферійному рівні.

5. У тексті дисертації трапляються редакційні неточності, зокрема дублювання першого пункту в переліку напрямів подальших досліджень, окремі описки («данних», «обгрунтування», «обраобки»).

Висловлені зауваження мають рекомендаційний характер і не ставлять під сумнів наукову цінність та практичну значущість дисертаційної роботи Маційовського Вадима Анатолійовича.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Мацієвського Вадима Анатолійовича на тему «Модель, методи, алгоритми та програмне забезпечення опрацювання результатів біомедичних показників» є самостійним, завершеним науковим дослідженням, підготовленим з дотриманням принципів академічної доброчесності. Робота вирішує актуальне науково-прикладне завдання розроблення моделі, методів, алгоритмів та програмного забезпечення опрацювання біомедичних показників, що забезпечують стійкість простору ознак до гетерогенності джерел даних IoMT, інтерпретованість автоматизованих клінічних висновків та можливість розширення номенклатури джерел даних без перенавчання предиктивної моделі.

Дисертаційна робота відповідає вимогам чинного законодавства України, передбаченим пунктами 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 Мацієвський Вадим Анатолійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент:

Кандидат технічних наук,
доцент, завідувач кафедри
біотехнічних систем
Тернопільського національного
технічного університету імені
Івана Пулюя Євгенія ЯВОРСЬКА

Проректор з наукової роботи ТНТУ
доктор технічних наук, професор Павло МАРУЩАК