Голові разової
спеціалізованої вченої ради PhD 13223
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя
д.т.н., професору
Литвиненку Ярославу Володимировичу

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора
Юзефовича Романа Михайловича на дисертаційну роботу
Мосія Любомира Євгенійовича
“Моделі та методи інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак електрокардіосигналів”, подану до захисту на здобуття
наукового ступеня **доктора філософії** з галузі знань 12 “Інформаційні технології” спеціальності 122 “Комп’ютерні науки”

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасна система охорони здоров’я перебуває у стані, що характеризується високою поширеністю серцево-судинних захворювань. За даними Всесвітньої організації охорони здоров’я вони залишаються провідною причиною смертності у світі, зумовлюючи близько третини всіх летальних випадків. У цьому контексті особливої актуальності набуває розроблення та впровадження сучасних інформаційних технологій підтримки діагностичних рішень, побудованих на основі математичного моделювання та інтелектуального аналізу електрокардіосигналів.

Для неінвазивного оцінювання роботи серця особливе місце посідає електрокардіографія – передусім завдяки технологічній простоті, низькій собівартості обстеження, придатності для амбулаторного та домашнього моніторингу й високій інформативності щодо широкого спектра патологічних

станів. Реєстрація електричної активності міокарда дозволяє одночасно отримати дані про дві групи діагностичних ознак: морфологічні – пов'язані з геометрією та амплітудними значеннями зубців P, Q, R, S, T у межах кардіоциклу, та ритмічні – пов'язані зі статистичними характеристиками часових інтервалів між послідовними циклами. Саме поєднання цих двох інформативних компонентів робить електрокардіосигнал особливо цінним об'єктом для побудови інтелектуальних діагностичних систем.

Суттєвим обмеженням існуючих методів аналізу електрокардіосигналів є те, що поширені алгоритми виділення морфологічних ознак не враховують стохастичний характер варіацій амплітуд однойменних зубців у послідовних кардіоциклах. Водночас кількісна оцінка ритмічної складової традиційно редукується до аналізу лише RR-інтервалів, залишаючи поза увагою варіабельність часових проміжків між іншими реперними точками сигналу. Такий підхід істотно звужує множину діагностично релевантних ознак, що можуть бути екстраговані з електрокардіосигналу, ускладнює ідентифікацію локальних порушень електричної активності міокарда та знижує інформативність ознакового простору для подальших алгоритмів машинного навчання.

З огляду на викладене, тема дисертаційної роботи Мосія Любомира Євгенійовича, спрямована на підвищення ефективності автоматизованої кардіодіагностики шляхом розроблення моделей та методів інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак електрокардіосигналів на основі апарату циклічних випадкових процесів із сегментною зонною структурою, нових математичних моделей функцій амплітудної та часової варіабельності зубців, а також сучасних алгоритмів машинного навчання й інтерпретованого штучного інтелекту, є безперечно актуальною як з наукової, так і з прикладної точки зору.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, темами

Дисертаційна робота Мосія Л. Є. виконана на кафедрі комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (далі – ТНТУ ім. І. Пулюя). Тематика роботи пов'язана з напрямом наукової роботи міжнародної наукової школи "Моделювання та математичне забезпечення інтелектуалізованих інформаційних систем в медицині, техніці та економіці", що функціонує на кафедрі комп'ютерних наук ТНТУ ім. І. Пулюя.

Дисертаційна робота пов'язана також із виконанням науково-дослідної роботи "Інтелектуальні моделі в кібер-фізичних системах медико-біологічних процесів" (№ державної реєстрації 0125U000105), яку виконано у Тернопільському національному медичному університеті ім. І.Я. Горбачевського МОЗ України, в межах якої здобувачем обґрунтовано та розроблено нові діагностичні ознаки для застосування в інтелектуальних системах кардіодіагностики.

3. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

Сукупність отриманих наукових результатів забезпечує комплексний розв'язок задачі підвищення ефективності автоматизованого аналізу електрокардіосигналів через побудову математичних моделей з врахуванням їх морфо-ритмічної структури і розроблення відповідних обчислювальних методів інтелектуальної обробки. У дисертаційній роботі здобувачем отримано наступні нові наукові результати.

1. Уперше запропоновано математичні моделі міжциклової мінливості морфології та ритму електрокардіосигналу у вигляді двох пов'язаних випадкових послідовностей – функції амплітудної варіабельності (ФАВ), елементами якої є різниці амплітудних значень однойменних характеристичних зубців у послідовних кардіоциклах, та функції часової варіабельності (ФЧВ), що описує тривалості часових проміжків між піками однойменних зубців у суміжних циклах. Це створює методологічну основу для побудови нових комплексів діагностично значущих ознак, отриманих зі статистичних характеристик ФАВ та ФЧВ.

2. Уперше розроблено метод виділення морфологічних діагностичних ознак електрокардіосигналу, що ґрунтується на його поданні як циклічного випадкового процесу із сегментною зонною структурою. На відміну від відомих підходів, які оперують переважно усередненими морфологічними характеристиками, запропонований метод дозволяє оцінити як математичне сподівання, так і дисперсію значень сигналу в межах сегмента та зони кардіоциклу.

3. Отримав подальший розвиток метод виділення ритмічних діагностичних ознак електрокардіосигналу на основі моделі циклічного випадкового процесу із сегментною зонною структурою – у відомі підходи введено врахування розкиду тривалостей як повних кардіоциклів, так і окремих діагностичних зон у межах циклу. Це дозволяє оперувати ширшим спектром ритмічних характеристик, ніж

класичний аналіз варіабельності серцевого ритму, який обмежений лише послідовністю RR-інтервалів, та формує підґрунтя для більш диференційованого опису ритмічних порушень роботи серця.

4. Отримав подальший розвиток метод класифікації серцево-судинних захворювань, що спирається на статистичні дескриптори функції амплітудної варіабельності як вхідні ознаки для алгоритмів машинного навчання та доповнений процедурами інтерпретованого штучного інтелекту, зокрема SHAP-аналізом. Інтеграція пояснювальних механізмів дала змогу не лише підвищити кількісні показники якості класифікації, а й формально обґрунтувати внесок окремих ознак у прийняття класифікаційного рішення, що принципово важливо для впровадження таких систем у реальну клінічну практику.

4. Короткий аналіз основного змісту дисертації

Вступ містить обґрунтування актуальності обраної тематики, формулювання мети та задач дослідження, визначення його об’єкта і предмета, виклад наукової новизни та практичної значущості одержаних результатів, інформацію про зв’язок із науковими програмами і темами, а також відомості про апробацію результатів та авторські публікації за темою дисертації.

Перший розділ “Моделі, методи та інформаційні технології аналізу електрокардіосигналів (огляд літературних джерел)” присвячено систематичному аналізу літератури за темою дисертації. У ньому послідовно розкрито три тематичні блоки: клінічне призначення електрокардіографії та сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій кардіодіагностики – від апаратно-програмних рішень реального часу до телемедичних платформ і систем на основі штучного інтелекту; арсенал методів виділення морфологічних і ритмічних характеристик кардіосигналу – від класичних процедур фільтрації та детекції R-зубців до підходів машинного й глибокого навчання; а також критичний огляд існуючих математичних моделей електрокардіосигналу, у тому числі тих, які тією чи іншою мірою враховують його циклічну природу. За підсумками огляду здобувач формулює перелік вимог до моделей і методів інтелектуального аналізу, які підлягають розробці у наступних розділах.

У другому розділі “Математичні моделі у вигляді циклічних випадкових процесів у задачах аналізу морфологічних і ритмічних ознак

електрокардіосигналів" закладено математичний фундамент дисертації. Спираючись на апарат циклічних випадкових процесів, здобувач обґрунтовує модель електрокардіосигналу із сегментною зонною структурою, у якій змінність частоти серцевих скорочень формалізована через функцію ритму $T(t,n)$; такий підхід дає змогу описати одночасно і морфологію кардіоциклу, і його часову мінливість. На цій основі введено дві випадкові послідовності – функцію амплітудної варіабельності, що відображає різниці амплітудних значень однойменних характеристичних зубців у послідовних кардіоциклах, та функцію часової варіабельності, що описує тривалості часових проміжків між піками однойменних зубців. Окремо розглянуто процедури оцінювання функції ритму, а також статистичних характеристик процесу – математичного сподівання та дисперсії в межах кардіоциклу.

Третій розділ "Інформаційна технологія інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак електрокардіосигналів на основі математичної моделі циклічного випадкового процесу, функцій амплітудної та часової варіабельності" присвячено побудові цілісної інформаційної технології, що інтегрує запропоновані у попередньому розділі моделі та методи. Подано її структурну схему й виконано експериментальну верифікацію на реальних кардіозаписах. За допомогою розкладу в ряд Фур'є проведено спектральний аналіз математичного сподівання та дисперсії електрокардіосигналу в межах одного циклу, що дало змогу виявити спектральні патерни, характерні для різних типів кардіологічних патологій. Статистичну валідацію функцій ФАВ і ФЧВ виконано на вибірці з 204 записів бази PhysioNet.

У четвертому розділі "Результати застосування методів машинного навчання для класифікації електрокардіосигналів за морфологічними і ритмічними ознаками" здобувач переходить від математичних моделей до прикладних задач кардіодіагностики, зосереджуючись на алгоритмічній обробці виділених ознак методами машинного навчання. У першій частині дослідження для задачі класифікації передсердних аритмій (фібриляція та тріпотіння передсердь) порівняно ефективність чотирьох алгоритмів виявлення аномалій – однокласової машини опорних векторів (OneClassSVM з RBF-ядром), ізоляційного лісу (Isolation Forest),

локального фактора викиду (LOF) та еліптичної оболонки (Elliptic Envelope). Показано вирішальний вплив попередньої обробки даних (StandardScaler + PCA): точність класифікації за морфологічними ознаками зростає з діапазону 52-83 % до 98-100 %, причому стабільно найкращі результати для фібриляції передсердь демонструє метод LOF. У другій частині – з метою розширення діагностичних можливостей – проведено чотирикласову класифікацію серцево-судинних захворювань за десятьма статистичними дескрипторами ФАВ (середнє, медіана, мода, стандартне відхилення, дисперсія, ексцес, асиметрія, розмах, мінімум, максимум) із застосуванням платформи AutoML PyCaret. Порівняння десяти алгоритмів виявило перевагу класифікатора Random Forest, який забезпечує показники Accuracy = 0,9187; AUC = 0,9433; F1 = 0,9186. Для забезпечення інтерпретованості рішень моделі автор застосовує SHAP-аналіз, який на глобальному та локальному рівнях фіксує домінувальну роль показників асиметрії та ексцесу ФАВ як ключових діагностичних ознак морфологічних патологій міокарда.

Аналіз структури та змісту дисертаційної роботи в цілому дає підстави стверджувати, що поставлені у вступі задачі дисертаційного дослідження здобувачем розв'язано послідовно та у повному обсязі.

5. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи достатньо обґрунтовано коректним використанням математичного апарату теорії циклічних випадкових процесів, методів математичної статистики та лінійної алгебри, методів математичного й комп'ютерного моделювання, а також сучасних алгоритмів машинного навчання, що підкріплено успішним практичним впровадженням результатів дисертаційного дослідження через експериментальну верифікацію на даних PhysioNet, що продемонструвало відповідність теоретичних досліджень реальним результатам.

Обґрунтованість сформульованих у дисертаційній роботі наукових положень та висновків є достатньою. Вона базується на детальному аналізі сучасного стану математичного моделювання та інтелектуального аналізу електрокардіосигналів, дослідженні існуючих математичних моделей циклічних випадкових процесів і методів обробки кардіосигналів, чіткій постановці задач дослідження,

використанні сучасних дослідницьких методів, обґрунтованому та якісному формулюванні висновків.

Достовірність та обґрунтованість запропонованих математичних моделей і методів інтелектуального аналізу електрокардіосигналів підтверджуються результатами експериментальних досліджень та коректним застосуванням наукових підходів. Зокрема, побудова математичної моделі електрокардіосигналу у вигляді циклічного випадкового процесу із сегментною зонною структурою, формалізація моделей функцій амплітудної та часової варіабельності, статистична валідація моделей із застосуванням критеріїв Колмогорова-Смірнова, Дікі-Фуллера, Андерсона-Дарлінга, Ліллієфорса і Шапіро-Уілка, а також застосування SHAP-аналізу для інтерпретації класифікаційних рішень забезпечують математично обґрунтовану основу для ідентифікації та аналізу діагностичних ознак.

Сформульовані в дисертаційній роботі наукові положення, висновки та рекомендації логічно випливають з отриманих результатів, що сформульовані за допомогою чітких та лаконічних тлумачень. Верифікація розроблених моделей, методів та програмного комплексу підтвердила коректність функціонування запропонованої інформаційної технології та зручність її використання. Тому можна стверджувати, що отримані в роботі висновки та практичні рішення коректні, достатньо обґрунтовані й можуть бути рекомендовані для використання у системах інтелектуального аналізу електрокардіосигналів та підтримки прийняття діагностичних рішень.

6. Практичні результати роботи

Практична цінність отриманих результатів полягає у їх реалізації у вигляді математичних моделей, алгоритмів та програмних рішень для інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак електрокардіосигналів. На їх основі створено програмний комплекс “Статистична обробка та моделювання циклічних сигналів”, що забезпечує два рівні аналізу: базовий – із використанням моделі циклічного випадкового процесу, та експрес-рівень – на основі статистичних характеристик амплітудної й часової варіабельності. Такий підхід сприяє підвищенню об’єктивності та відтворюваності діагностичних висновків.

Використання розроблених моделей та методів дало змогу створити комплексну інформаційну технологію автоматизованого аналізу

електрокардіосигналів, яка враховує циклічну природу сигналу та його морфо-ритмічну варіабельність, мінімізує суб'єктивність експертних оцінок завдяки використанню статистично обґрунтованих діагностичних ознак, уніфікує процедуру опрацювання сигналу від попередньої обробки до інтерпретації класифікаційних рішень засобами SHAP-аналізу та надає лікарю-кардіологу структуровані кількісні результати аналізу як основу для встановлення діагнозу серцево-судинних захворювань.

Результати дисертаційного дослідження знайшли практичне застосування у виконанні науково-дослідної роботи "Інтелектуальні моделі в кібер-фізичних системах медико-біологічних процесів" (№ державної реєстрації 0125U000105) Тернопільського національного медичного університету ім. І.Я. Горбачевського МОЗ України. Результати дисертаційної роботи впроваджено та використовуються у ТОВ "НВП «ІНФОТЕХМЕД" (м. Тернопіль), в освітній діяльності Тернопільського національного медичного університету ім. І.Я. Горбачевського (кафедра медичної інформатики, дисципліни "Інформаційні технології у фармації", "Медична фізика з медичною інформатикою та статистикою") і Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (кафедра комп'ютерних наук, дисципліна "Моделі, технології проєктування та управління інформаційних систем"), що засвідчує практичну значущість та готовність розроблених методологій і інструментів до реального використання в медичній та освітній практиці.

7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях.

Структура дисертаційної роботи включає вступну частину, чотири основні розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додаткові матеріали. Загальний обсяг дослідження становить 221 сторінку, з яких безпосередньо основний зміст викладено на 131 сторінці, додатки – на 50 сторінках (9 додатків). Робота містить 30 рисунків, 77 формул і 20 таблиць. Бібліографічний список налічує 152 позиції. Дисертацію оформлено згідно з "Вимогами до оформлення дисертації", затвердженими Наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 року № 40.

Структура дисертаційної роботи є логічною та зв'язною. Основні висновки та рекомендації логічно випливають з отриманих у розділах роботи результатів. Список використаних джерел містить сучасні джерела, що відповідають предметній області дослідження.

У дисертації не виявлено текстових запозичень та використання наукових результатів інших науковців без зазначення посилань на відповідні джерела. Використання матеріалів інших дослідників здійснено з дотриманням вимог наукової етики та містить належні посилання на відповідні джерела.

Результати дисертаційного дослідження висвітлено у 20 наукових публікаціях, з яких 12 статей опубліковано у наукових фахових виданнях України та 8 праць представлено на конференціях міжнародного рівня, у тому числі 4 статті у матеріалах конференцій, що індексуються наукометричною базою Scopus. За кількісними та якісними показниками наукових публікацій дисертаційна робота повністю задовольняє критерії «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії». Ключові наукові положення дисертації адекватно представлено в опублікованих наукових працях автора.

Оприлюднення наукових результатів дисертанта в рецензованих наукових виданнях, що здійснюють контроль матеріалів на предмет відсутності неправомірних запозичень, є додатковим свідченням дотримання норм академічної доброчесності. За підсумками аналізу дисертаційної роботи Мосія Л.Є. фактів порушення академічної доброчесності не виявлено. Забезпечено дотримання критеріїв щодо кількісних та якісних показників публікацій.

8. Мова та стиль дисертаційної роботи

Виклад матеріалу в дисертаційній роботі здійснено українською мовою з дотриманням норм академічного стилю. Текст роботи є логічно структурованим: окремі підрозділи послідовно підпорядковано загальній логіці дослідження, а перехід від теоретичних побудов до експериментальних результатів і прикладних реалізацій виглядає природним. Стиль викладу витриманий, формулювання чіткі, понятійний апарат застосовується послідовно протягом усієї дисертації, що сприяє точному сприйняттю наукових результатів читачем.

Тема, зміст та отримані наукові результати дисертаційної роботи повністю відповідають спеціальності 122 “Комп’ютерні науки” галузі знань 12 “Інформаційні технології”.

9. Зауваження до дисертації:

1. У роботі доцільно було б розглянути кореляційні і спектральні властивості характерних реальних кардіосигналів.

2. Означення (стор. 61) невдало сформульовано.

3. Структурна схема (рис. 3.1, стор. 90) є перевантаженою і занадто громіздкою для розуміння.

4. Автор місцями недостатньо чітко використовує математичні терміни (“…дисперсія моделі…” замість “…величина дисперсії даних у моделі…”).

5. Відносні похибки слід було представити у відсотках.

6. Автор вживає термін “характерні хвилі”. Не зрозуміло, що мається на увазі.

7. У висновках розділу 3 автор говорить про функціонал, але сам виглядд функціоналу не поданий.

8. Наведений у Додатку К Фрагмент програмного коду розробленого ПЗ не є інформативним для даної роботи.

9. По тексту зустрічаються граматичні, орфографічні та стилістичні помилки.

Наведені зауваження не впливають на якісні характеристики дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Мосія Любомира Євгенійовича на тему “Моделі та методи інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак електрокардіосигналів ” 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 підвищення ефективності автоматизованої кардіодіагностики внаслідок розроблення методів інтелектуального аналізу морфологічних і ритмічних ознак електрокардіосигналів на основі математичної моделі у вигляді циклічного випадкового процесу із сегментною зонною структурою, функцій амплітудної та часової варіабельності зубців електрокардіосигналів, методів їх статистичного оцінювання та алгоритмів класифікації.

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 Мосій Любомир Євгенійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

Офіційний опонент,
завідувач відділу методів та засобів
відбору й обробки діагностичних сигналів
Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка
Національної академії наук України,
доктор технічних наук, професор Роман Юзефович

Підпис Романа Юзефовича
ЗАСВІДЧУЮ
Вчений секретар ФМІ НАН України
В.В.Корній

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Г.В.КАРПЕНКА
03534506