

Голові разової спеціалізованої
вченої ради PhD 8700
Хмельницького національного університету,
доктору технічних наук, професору,
Тетяні ГОВОРУЩЕНКО

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

д.т.н., проф. Шаховської Наталі Богданівни
на дисертаційну роботу Ковальчука Олексія Володимировича
«Методи виявлення патологій за сигналом електрокардіограми засобами
пояснювального штучного інтелекту»,
подане на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки

1. Актуальність теми дослідження

Проблема своєчасної діагностики серцево-судинних патологій залишається однією з ключових у сучасній кардіології. Аритмії, як одна з груп серцевих захворювань, можуть тривалий час протікати безсимптомно, однак при цьому становити серйозну загрозу життю пацієнта, оскільки можуть переходити у складніші форми серцевих хвороб. З огляду на це, автоматизовані системи аналізу ЕКГ-сигналів, здатні швидко та точно виявляти відхилення, мають важливе клінічне значення.

Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах цифровізації охорони здоров'я, коли великі обсяги медичних даних потребують нових підходів до їх ефективного опрацювання. Традиційні методи вже не здатні повноцінно обслуговувати ці потреби, натомість інтелектуальні системи, побудовані на основі методів машинного та глибокого навчання, демонструють високу ефективність в аналізі складних і варіативних біомедичних сигналів. Однак у медичній практиці принципово важливо не лише забезпечити точність автоматичної класифікації, а й пояснити, на основі яких ознак система сформувала висновок. Це зумовлює необхідність застосування підходів пояснювального штучного інтелекту, що є надзвичайно важливим напрямом розвитку медичних інформаційних систем. Тому впровадження засобів пояснювального штучного інтелекту в інформаційні системи є необхідним кроком для забезпечення довіри з боку медичних фахівців.

Таким чином, дисертаційна робота Ковальчука Олексія Володимировича присвячена розробці методів виявлення патологій за сигналом ЕКГ із використанням засобів пояснювального штучного інтелекту, що є надзвичайно актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору.

Зазначена науково-прикладна задача відповідає предметній області Стандарту вищої освіти України із спеціальності 122 – Комп'ютерні науки для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження, результати яких викладено в дисертації, виконано під час виконання окремих розділів науково-дослідної роботи за держбюджетною темою Хмельницького національного університету «Система виявлення ЗПЗ та комп'ютерних атак в корпоративних мережах з використанням хибних об'єктів атак та пасток» (ДР № 0124U000980). У межах проведеної науково-дослідної роботи за держбюджетною темою, автор здійснив розробку методів обробки інформації предметної галузі засобами штучного інтелекту, а також виконав оцінку отриманих результатів за ключовими метриками.

3. Формулювання наукової задачі, мети й задач дослідження

Здобувачем правильно визначено наукову задачу, об'єкт і предмет дослідження, відповідно до висунутої заздалегідь гіпотези дослідження.

Об'єктом дослідження є процес виявлення патологій аритмій на електрокардіограмі засобами глибокого навчання з подальшою інтерпретацією отриманих результатів.

Предметом дослідження є методи та засоби глибокого навчання для виявлення патологій аритмій на електрокардіограмі.

Мету дослідження визначено як покращення точності класифікації патологій аритмій на електрокардіограмі засобами глибокого навчання з подальшою інтерпретацією отриманих результатів за допомогою ознак, що використовуються у медичній практиці.

Поставлену мету досягнуто в результаті розв'язання наступних задач:

- провести аналіз методів, засобів та технологій для виявлення патологій аритмій на електрокардіограмі;
- розробити метод ідентифікації R-зубців на ЕКГ-сигналі за моделлю глибокого навчання;
- розробити метод класифікації патологій аритмій на ЕКГ-сигналі за моделлю глибокого навчання;
- розробити метод інтерпретації отриманих результатів класифікації сигналів ЕКГ за допомогою ознак, що використовуються у медичній практиці;
- розробити інформаційну систему для валідації запропонованих методів та провести експериментальні дослідження.

4. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1) розроблено новий метод ідентифікації R-зубців на ЕКГ-сигналі, який відрізняється від існуючих використанням моделі глибокого навчання з двома вхідними сигналами — ЕКГ-сигналом та, синхронним з ним, сигналом з прогнозованим розташуванням R-зубців, що дало змогу підвищити точність ідентифікації.

2) удосконалено метод класифікації патологій аритмій на ЕКГ-сигналі, який відрізняється від відомих використанням тріади кардіоциклів, що дозволяє сформувати

контекстну інформацію виникнення кардіоциклу, для подальшої класифікації вдосконаленою архітектурою моделі глибокого навчання, що дозволило збільшити кількість патологій для розпізнавання та підвищити точність класифікації;

3) вперше розроблено метод інтерпретації результатів класифікації патологій аритмій, отриманих з ЕКГ-сигналу за моделями глибокого навчання, що дало змогу подати результати класифікації за ознаками, що використовуються у медичній практиці.

5. Короткий аналіз основного змісту дисертації

Робота складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 151 найменування на 18 сторінках та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 166 сторінок, з них 127 сторінок основного тексту. Дисертація містить 64 рисунки та 19 таблиць.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету та основні завдання, предмет та об'єкт дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У *першому* розділі здійснено аналіз сучасних методів для пошуку R-зубців на ЕКГ-сигналі для виділення кардіоциклів, методів ідентифікації патологій аритмій на ЕКГ-сигналі, зокрема тих що базуються на моделях глибокого навчання. Також розглянуто існуючі підходи до інтерпретації прийнятих рішень моделями глибокого навчання. Розглянуто методики оцінювання результатів, отриманих за моделями глибокого навчання. Сформульовано постановку задачі дослідження.

У *другому* розділі представлено модель процесу виявлення аритмій на основі ЕКГ-сигналів із застосуванням методів глибокого навчання та пояснювального штучного інтелекту. Запропоновано методи ідентифікації R-зубців і класифікації патологій аритмій. Запропоновано підхід до інтерпретації результатів, що дозволяє співвідносити отримані результати класифікації з клінічно значущими ознаками.

У *третьому* розділі розроблено архітектуру інформаційної системи для виявлення патологій аритмій за сигналами ЕКГ. Визначено функціональні та апаратні вимоги до інформаційної системи. Наведено приклад реалізації інформаційної системи із використанням запропонованих в даній дисертації методів аналізу і обробки ЕКГ-сигналу методів глибокого навчання.

У *четвертому* розділі здійснено експериментальне дослідження та оцінка результатів, отриманих за допомогою запропонованих методів. Подано перелік використаних наборів даних із їхнім описом, що стали основою для проведення експериментів та оцінки запропонованих методів. Додатково наведено результати оцінювання результатів класифікації патологій аритмій із використанням клінічних даних. Наведено отриману інтерпретацію результатів класифікації за запропонованим методом.

У *висновках* подано отримані наукові та практичні результати дослідження.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

6. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені у дисертації, є виваженими, логічно аргументованими та підтвердженими практичною реалізацією. Обґрунтованість базується на наукових положеннях та висновках дисертації ґрунтується на глибокому аналізі наукових джерел, чітко сформульованих завданнях дослідження та застосуванні сучасних методів глибокого навчання і пояснювального штучного інтелекту.

Достовірність отриманих результатів підтверджується їхньою успішною апробацією на міжнародних наукових конференціях, а також впровадженням у практичні рішення, що засвідчує їхню прикладну цінність.

7. Практичні результати роботи

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці та впровадженні інформаційної системи для автоматизованого виявлення патологій аритмій за сигналами ЕКГ із використанням методів глибокого навчання та пояснювального штучного інтелекту. Запропонована система дозволяє автоматично виявляти R-зубці на ЕКГ-сигналі та здійснювати класифікацію визначених кардіоциклів на предмет наявності підтримуваних 9 класів патологій аритмій. Результати класифікації подаються у зручному для лікаря вигляді, мають рекомендаційний характер, підвищуючи ефективність первинної діагностики. Ключовим елементом системи є можливість інтерпретації отриманих рішень. Результати класифікації подаються за ознаками, які використовуються у медичній практиці, що робить висновки моделі більш зрозумілими та прийнятними для лікаря, сприяючи зростанню довіри до штучного інтелекту в медичній сфері. Реалізація системи базується на клієнт-серверній архітектурі, де обчислювальні операції виконуються на віддаленому сервері з відповідним апаратним забезпеченням, тоді як клієнтська частина відповідає лише за передачу даних та візуалізацію результатів. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати систему навіть у медичних установах з обмеженими ресурсами.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи впроваджено: у медичному лікувально-діагностичному центрі «Сіліція-Сіті+» (довідка про впровадження); ТОВ «АЙ ТІ ХУТ» (довідка про впровадження); у навчальному процесі Хмельницького національного університету (акт впровадження); при виконанні держбюджетної теми Хмельницького національного університету «Система виявлення ЗПЗ та комп'ютерних атак в корпоративних мережах з використанням хибних об'єктів атак та пасток» (ДР № 0124U000980).

8. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати опубліковано у 8 наукових працях, серед яких 1 стаття у періодичному виданні 1-го квартилю, що індексується в наукометричних базах Scopus, Web of Science; 3 статті — у фахових наукових журналах України, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України категорії Б; 4 публікації,

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (статті в матеріалах конференцій, що індексуються у наукометричній базі Scopus). Отримано 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

Також результати дисертації апробовані на наступних 4 міжнародних наукових семінарах: 5th International Conference on Informatics & Data-Driven Medicine (м. Ліон, Франція, 2022); IntelITSIS'2023: 4th International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (м. Хмельницький, 2023); IDDM'2023: 6th International Conference on Informatics & Data-Driven Medicine (м. Братислава, Словаччина, 2023); ICyberPhyS-2024: 1st International Workshop on Intelligent & CyberPhysical Systems (м. Хмельницький, 2024).

9. Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації

1. У роботі висунуто гіпотезу про те, що використання попереднього та наступного кардіоциклів (утворення тріади) підвищує точність класифікації патологій. Однак не подано порівняльного експериментального аналізу варіантів із різною кількістю сусідніх кардіоциклів, що не дозволяє переконатися, що саме тріада кардіоциклів є достатньою.

2. У роботі відсутній аналіз обчислювальної складності через збільшення розміру вхідних даних (тріада кардіоциклів) та розширення CNN-архітектури.

3. У дисертації відсутнє обґрунтоване доведення коректності вибору порогового значення 0,1 у методі ідентифікації R-зубців, що не дозволяє переконливо підтвердити його оптимальність.

4. У розділі 2 подається довжина вікна 260 відліків та поріг 0,1 як «визначені експериментально», хоча самі експерименти та їх результати наведені лише у розділі 4. Таке подання матеріалу не є послідовним та логічним: саме у теоретичній частині потрібно було навести ці параметри та обґрунтувати їх аналітично, або експериментально.

5. Матеріал викладений в підрозділі 4.1 є описом існуючих наборів даних і не представляє новизни або особливостей пов'язаних з розроблюваними методами. Тому цей підрозділ варто було перенести до розділу 1.

6. Під час перевірки методу класифікації аритмій використовувались набори даних із незбалансованими класами, що може впливати на об'єктивність оцінки точності моделі, особливо для менш представлених патологій. Додатково, через обмеження обраних наборів даних використовуються сигнали записані лише з одного (II) відведення ЕКГ, тоді як загальноприйнятим стандартом є використання 12 відведень. Така обмеженість вхідних даних знижує клінічну цінність дослідження. Це, в свою чергу, обмежує можливості моделі для реального застосування в медичній практиці.

7. Опис пункту «Оцінки результатів, отриманих за моделями глибокого навчання для медичних систем» подано в межах підрозділу 1.4 «Ознаки ЕКГ-сигналу, за якими

приймається рішення про патологію аритмії у медичній практиці», що виглядає нелогічно з погляду структури роботи. Такий зміст виходить за межі тематики підпункту, змішуючи клінічні критерії з технічними аспектами оцінювання моделей.

8. У тексті роботи простежується неузгоджене використання термінів українською та англійською мовами. Зокрема, переважно використовуються українські відповідники «машинне навчання» та «глибоке навчання», а на сторінці 68 використано англomовні варіанти – «deep learning» і «machine learning». Те саме стосується використання термінів «згортоква нейронна мережа» та «CNN-мережа».

Однак, наведені зауваження не є принциповими та не знижують наукову та практичну цінність роботи.

Загальний висновок

На основі викладеного вище вважаю, що дисертація Ковальчука Олексія Володимировича на тему «Методи виявлення патологій за сигналом електрокардіограми засобами пояснювального штучного інтелекту», що подана на здобуття ступеня доктора філософії, за змістом та оформленням, за своїм науковим рівнем та практичною цінністю повністю відповідає вимогам, визначеним пунктами 6, 7, 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 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор, Ковальчук Олексій Володимирович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

Офіційний опонент:

д.т.н., проф. директорка інституту
комп'ютерних наук та інформаційних
технологій національного університету
«Львівська політехніка»

Наталія ШАХОВСЬКА

Підпис засвідчую:

Кандидат технічних наук, доцент,
вчений секретар
Національного університету «Львівська
політехніка»
МОН України



Роман БРИЛИНСЬКИЙ