

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

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційне дослідження Ковальчука Олексія Володимировича на тему
«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

Актуальність теми дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт університету

Серцево-судинні захворювання є одними з найпоширеніших у світі та становлять серйозну загрозу для життя та здоров'я людей. Особливе місце серед них займають аритмії. Своєчасна діагностика аритмій надає можливість для запобігання ускладненням і забезпечує ефективне лікування.

Найпоширенішим методом виявлення аритмій є електрокардіографія, яка дозволяє реєструвати електричну активність серця та виявляти характерні зміни, що свідчать про наявність патології. Оскільки аналіз великих обсягів ЕКГ-даних є трудомістким і схильним до помилок, усе частіше для автоматизації цього процесу застосовуються інформаційні технології.

В процесі автоматизації все активніше впроваджуються методи штучного інтелекту, зокрема машинне навчання (ML) і глибоке навчання (DL), які дозволяють автоматично аналізувати великі обсяги ЕКГ-даних та виявляти патології. Одним із найефективніших інструментів у цьому напрямку є згорткові нейронні мережі (CNN), які вже продемонстрували високу точність у класифікації аритмій та інших серцевих захворювань. Таким чином, інтеграція сучасних технологій у процес діагностики дозволяє значно зменшити навантаження на лікарів і підвищити швидкість постановки діагнозу.

Однак, всупереч успіхам в цій галузі, використання моделей глибокого навчання в медицині стикається з важливою проблемою, а саме із відсутністю прозорості у прийнятті рішень. Моделі часто виступають як так звані «чорні скриньки», коли кінцевий користувач (лікар) не може зрозуміти, чому система класифікувала сигнал певним чином. У клінічній практиці така непрозорість викликає недовіру до автоматизованих систем, що стримує їх широке впровадження.

У цьому контексті особливої актуальності набуває напрям пояснювального штучного інтелекту, який спрямований на розробку моделей, здатних не лише приймати рішення, а й пояснювати їх. Впровадження пояснювального штучного інтелекту у діагностику аритмій дозволяє підвищити прозорість процесу, покращити взаємодію між людиною і системою, а також сприяти прийняттю обґрунтованих клінічних рішень. Такий підхід відкриває нові перспективи у розвитку безпечних і ефективних систем медичної діагностики.

Таким чином, дослідження, спрямоване на розробку методів ідентифікації аритмій на основі ЕКГ-сигналів із використанням глибокого навчання та пояснювального штучного інтелекту, є актуальним. Воно відповідає сучасним запитам охорони здоров'я, сприяє підвищенню точності діагностики та водночас забезпечує прозорість і довіру до рішень, що приймаються автоматизованими системами. Це робить тему дослідження важливою 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.

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.

Формулювання наукової задачі, мети й задач дослідження.

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

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

Наукова новизна одержаних автором 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 сформулювати 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.

Короткий аналіз основного змісту дисертації.

У вступі автором коротко обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, основні завдання, предмет та об'єкт дослідження, наведено наукову новизну, практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі здійснено аналіз сучасного стану методів і підходів до пошуку R-зубців на ЕКГ-сигналі, класифікації патологій аритмій із використанням засобів штучного інтелекту та інтерпретації рішень прийнятих моделями глибокого навчання. Розглянуто ознаки ЕКГ-сигналу, за якими приймається рішення про патології аритмій у медичній практиці. Окрему увагу приділено методикам оцінювання результатів експериментів. Базуючись на розглянутій інформації було сформовано задачі дослідження.

У другому розділі представлено модель процесу виявлення аритмій на основі ЕКГ-сигналу, яка складається з трьох запропонованих методів. Зокрема, детально описано розроблений метод виявлення R-зубців на ЕКГ-сигналі, удосконалений метод класифікації патологічних форм аритмій, а також метод інтерпретації результатів класифікації, отриманих за допомогою моделей глибокого навчання. Останній метод ґрунтується на використанні ознак, які традиційно застосовуються в медичній практиці.

У третьому розділі представлено інформаційну систему для виявлення патологій аритмій за ЕКГ-сигналом. Розглянуто функціональні вимоги до системи, а також вимоги до апаратного забезпечення. Детально описано процес проектування архітектури інформаційної системи, яка реалізована за клієнт-серверною моделлю. Наведено узагальнений опис реалізації програмного забезпечення, що забезпечує функціонування цієї системи

У четвертому розділі наведено результати експериментального дослідження та оцінки запропонованих методів. Наведено оцінку точності методів виявлення R-зубців на ЕКГ-сигналі та методу класифікації патологій аритмій. Проведено порівняння результатів запропонованих методів із відомими методами. Окрему увагу приділено експериментам з використанням клінічних даних, що дозволило перевірити застосовність запропонованих рішень із використанням реальних медичних даних. Також розглянуто інтерпретацію результатів класифікації за запропонованим методом для окремих визначених патологій аритмій. Наприкінці розділу проаналізовано обмеження запропонованого підходу та окреслено напрями для його подальшого вдосконалення.

У висновках дисертації підсумовано ключові теоретичні та практичні результати проведеного дослідження. Сформульовані висновки та рекомендації послідовно випливають із отриманих результатів, детально викладених у відповідних розділах роботи.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації, базуються на комплексному аналізі та послідовному використанні сучасних методів глибокого навчання для аналізу ЕКГ-сигналів. Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням відкритих і загальновизнаних медичних баз даних, зокрема MIT-BIH, QT та CPSC-2020. Високі значення метрик якості Ассигасу, Precision, Recall та F1-score засвідчують ефективність запропонованих рішень, що висвітлено в роботі та підтверджено порівняльним аналізом із існуючими методами. Додаткову достовірність результатів забезпечують проведені клінічні дослідження. Ефективне впровадження результатів дослідження демонструє відповідність отриманих теоретичних результатів реальним результатам їхнього використання.

Практичне значення одержаних результатів.

Реалізована інформаційна система на основі методі пошуку R-зубців та класифікації ЕКГ-сигналу на наявність патологій аритмій забезпечують користувачу прогнози наявності патологій аритмій 9 підтримуваних класів для всіх виявлених кардіоциклів, що несе рекомендаційний характер та пришвидшує роботу лікаря в аналізі ЕКГ-сигналу.

Реалізована інформаційна система включає використання методу інтерпретації рішень класифікації патологій аритмій, отриманих за моделями глибокого навчання, дозволяє подати лікарю результати класифікації за ознаками, що використовуються в медичній практиці. Такий підхід робить рішення моделей глибокого навчання більш доступними для лікаря, забезпечуючи довіру до отриманих результатів.

Реалізована інформаційна система класифікації патологій аритмій та інтерпретації результатів класифікації базується на клієнт-серверній архітектурі, що дає змогу виконувати всі обчислення на віддаленому сервері з потужним обладнанням, тоді як клієнт здійснює лише передачу даних, отримання та візуалізацію результатів, що дає можливість використовувати систему в невеликих клініках з обмеженими обчислювальними 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).

Особистий внесок здобувача полягає в розробці методів аналізу та обробки ЕКГ-сигналів. У межах проведеного дослідження автором розроблено метод ідентифікації R-зубців на ЕКГ-сигналах, метод класифікації аритмій на ЕКГ-сигналі та метод інтерпретації результатів класифікації патологій аритмій, отриманих за допомогою моделі глибокого навчання. Усі наукові результати, представлені у дисертаційній роботі, отримані автором особисто.

За результатами проведених досліджень основні 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). Також автором отримано 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

У публікаціях опублікованих у співавторстві, автору належать основній ідеї, теоретична та практична розробка положень, а саме: класифікація аритмії на ЕКГ-сигналі засобами пояснювального глибокого навчання, метод ідентифікації R-зубців у сигналах електрокардіограми, метод класифікації аритмій на ЕКГ-сигналі, метод інтерпретації результатів класифікації ЕКГ методами глибокого навчання, підхід «людина у петлі» на основі МРТ та ЕКГ для діагностики в охороні здоров'я, класифікація ЕКГ за допомогою вектора ознак з використанням глибокого навчання, виявлення R-зубців на ЕКГ-сигналі із доданим синхронним сигналом можливого розташування R-зубців для підвищення точності виявлення за допомогою моделі глибокого навчання, класифікація та інтерпретація патологій аритмії на ЕКГ з використанням згорткових мереж для інтелектуальної IoT систем охорони здоров'я.

Апробація матеріалів дисертації.

Основні положення та наукові результати доповідались 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).

Структура та обсяг дисертації.

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

Зауваження.

1. У роботі не розглянуто поведінку запропонованого методу виявлення R-зубців у разі виникнення фібриляції шлуночків. За такої патології характерні значні порушення у структурі ЕКГ-сигналу, зокрема відсутність чітко виражених R-зубців, що може суттєво вплинути на точність обраного методу;

2. На рисунку 2.9 кроки 2.4 та 2.5 подано як послідовні, хоча в описі алгоритму згадано, що висновок про застосування кроки 2.4 чи 2.5 також за певних обставин можна зробити за результатами кроку 2.3;

3. На сторінці 87 використано терміни «додаток» та «вебдодатки», що не відповідає українській термінології у сфері інформаційних технологій. Відповідно до усталених рекомендацій, доцільно вживати варіанти «застосунок» та «вебзастосунок»;

4. У розділі 3.4 наведено скріншот стартового вікна клієнтської програми, на якому присутня опція «відкрити з бази даних». Однак у тексті відсутній опис відповідного модуля або його функціональних можливостей у складі інформаційної системи;

5. У переліку наукових публікацій, опублікованих у фахових виданнях України (ст. 8), сформовано посилання на статтю англійською мовою, хоча сама стаття опублікована українською.

Втім, зазначені зауваження суттєво не впливають на загальний, доволі високий, рівень проведеного дослідження.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота Ковальчука О.В. «Методи виявлення патологій за сигналом електрокардіограми засобами пояснювального штучного інтелекту» є завершеною науковою роботою, яка містить новий та актуальний науково-прикладний внесок. Усі результати, які виносяться на захист, є достовірними та отриманими автором особисто.

Тому вважаю, що дисертаційна робота «Методи виявлення патологій за сигналом електрокардіограми засобами пояснювального штучного інтелекту», яка подана на здобуття ступеня доктора філософії, за своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам пп. 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 наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

Рецензент:

д.т.н, професор, професор кафедри КПС,
Хмельницький національний університет

Єлизавета ГНАТЧУК

«Підпис Єлизавети ГНАТЧУК засвідчую»:
Проректор з наукової роботи ХНУ



Олег СИНЮК