

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

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

У медичній практиці дедалі більше уваги приділяється не лише ефективному лікуванню, а й швидкому та точному виявленню потенційно небезпечних станів. Однією з таких категорій є аритмія, яка може залишатися непоміченою, але водночас мати серйозні наслідки із перетіканням в більш серйозні захворювання. Зважаючи на це, пошук нових інструментів для покращення діагностики аритмій є надзвичайно актуальним.

У зв'язку з накопиченням великих обсягів ЕКГ-даних, традиційні методи обробки стають дедалі менш ефективними. Це зумовлює необхідність залучення методів штучного інтелекту, зокрема глибокого навчання, для автоматизації процесу діагностики. Згорткові нейронні мережі (CNN) продемонстрували високу точність у розпізнаванні патологій на електрокардіограмах і відкривають нові можливості для підвищення якості медичних рішень.

Незважаючи на високі показники точності, моделі глибокого навчання часто залишаються непрозорими у своїй логіці прийняття рішень. У медичній практиці, де обґрунтованість кожного діагностичного висновку має вирішальне значення, така непрозорість створює бар'єри для впровадження таких технологій у медичну практику.

У цьому контексті актуальним стає використання пояснювального штучного інтелекту (Explainable AI), який дозволяє не лише отримувати результати класифікації, а й надавати інтерпретації, зрозумілі для лікаря. Інтеграція ХАІ у процес діагностики патологій сприяє формуванню довіри до системи та підвищує безпеку прийнятих рішень. Таким чином, обрана тема дослідження, що поєднує методи глибокого навчання та пояснювального штучного інтелекту для аналізу ЕКГ-сигналів, є актуальною та перспективною.

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.

2. 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 дослідженням 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:

- 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.

3. Наукова новизна одержаних автором результатів полягає в наступному:

- 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.
- 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;
- 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.

4. Короткий аналіз основного змісту дисертації.

У вступі обґрунтовано актуальність темки дослідження, окреслено його мету, сформульовано основні завдання, визначено об'єкт і предмет дослідження. Також подано наукову новизну роботи та наведено її практичне значення.

Перший розділ присвячено аналізу існуючих підходів до автоматизованого виявлення R-зубців на електрокардіограмі, класифікації аритмій із застосуванням

методів штучного інтелекту, а також інтерпретації результатів класифікації, що формуються моделями глибокого навчання. Розглянуто особливості ЕКГ-сигналу, за якими лікарі приймають рішення щодо наявності патологій аритмій, та проаналізовано підходи до оцінювання результатів експериментальних досліджень. На основі проведеного аналізу було сформульовано задачі дослідження.

У другому розділі запропоновано загальну модель виявлення аритмій за ЕКГ-сигналами, що включає три запропоновані методи. Зокрема, описано алгоритм виявлення R-зубців, удосконалений метод класифікації аритмій, а також запропоновано метод до інтерпретації результатів роботи моделей глибокого навчання. Останній базується на ознаках, які використовуються в медичній практиці.

Третій розділ присвячено розробці інформаційної системи для автоматизованого виявлення аритмій. Висвітлено функціональні й технічні вимоги до програмного продукту, а також описано процес проектування архітектури системи.

У четвертому розділі представлено результати експериментального дослідження ефективності запропонованих методів. Проведено оцінювання за статистичними показниками методу виявлення R-зубців та класифікації аритмій, а також здійснено порівняння показників з існуючими підходами. Важливим та значущим є проведення перевірки методів на реальних клінічних даних. Також розглянуто приклади інтерпретації результатів класифікації для окремих видів аритмій.

У висновках узагальнено головні теоретичні положення та практичні результати роботи. Сформульовані висновки логічно впливають із змісту дослідження та узгоджуються з поставленими завданнями.

5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові положення, висновки та практичні рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, ґрунтуються на аналізі та застосуванні сучасних методів глибокого навчання для обробки та інтерпретації ЕКГ-сигналів. Надійність проведеного дослідження забезпечується системним застосуванням сучасних експериментальних підходів та використанням актуальних критеріїв оцінювання. Практичне впровадження результатів дослідження засвідчує відповідність теоретичних положень фактичним результатам їхнього застосування, що підкреслює актуальність та прикладну цінність проведеної роботи.

6. Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці інформаційної системи для автоматизованого виявлення патологій аритмій на основі аналізу ЕКГ-сигналів. Система здійснює пошук кардіоциклів за допомогою методу виявлення R-зубців, класифікацію кардіоциклів за дев'ятьма патологічними класами. Інтегрований механізм інтерпретації рішень, побудований з урахуванням ознак, прийнятих у медичній практиці, забезпечує прозорість роботи моделей глибокого навчання та підвищує довіру з боку користувача. Реалізація системи за клієнт-серверною архітектурою дозволяє виконувати основні обчислення на сервері, знижуючи вимоги до клієнтського обладнання, що робить її придатною для використання в закладах з обмеженими технічними 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).

7. Особистий внесок здобувача.

Усі наукові результати, представлені у дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. У межах проведеного дослідження здобувачем 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.

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 здобувачем отримано 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

У публікаціях опублікованих у співавторстві, здобувачу 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.

8. 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).

9. 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».

10. Зауваження.

1) на сторінці 103 зазначено, що тестовий набір сформовано на основі бази даних університету Глазго та включає фрагменти ЕКГ-сигналу, записані з відведення II під час трьох видів діяльності: сидіння, ходьби та виконання математичного тесту. Проте в роботі не пояснюється, чому було обрано саме ці стани, і не наводиться обґрунтування виключення інших видів активності, які також можуть впливати на серцевий ритм;

2) на сторінці 105 спостерігається неузгодженість у числових даних, пов'язаних із похибкою, яка використовується при розрахунку статистичних показників. У тексті зазначено, що допустима похибка становить ± 25 мс, однак далі стверджується, що загальне вікно похибки складає 100 мс, що є некоректним — фактичне вікно має становити 50 мс;

3) у роботі не завжди витримано єдину стилістику оформлення зображень із ЕКГ-сигналами. На одних рисунках ЕКГ-сигнал зображено червоним кольором, на інших — синім. Також у межах одного розділу зона уваги, яка використовується для інтерпретації результатів класифікації, подається з використанням різних кольорів, що створює враження різного ступеня важливості;

4) у тексті роботи наявні розділи, обсяг яких становить лише 1–2 сторінки. На мою думку така структура виглядає стилістично недоцільною і такі розділи можна було б укрупнити об'єднуючи з іншими контентом;

5) на рисунку 2.20 підписи осей графіків подано англійською мовою, що не відповідає загальній мовній стилістиці роботи.

Вважаю, що висловленні вище зауваження не є визначальними та не знижують наукову та практичну цінність дисертаційної роботи.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота Ковальчука Олексія Володимирович на тему «Методи виявлення патологій за сигналом електрокардіограми засобами пояснювального штучного інтелекту» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальну науково-прикладну задачу.

У роботі комплексно проаналізовано сучасні підходи до обробки ЕКГ-сигналів, запропоновано нові методи виявлення R-зубців, класифікації патологій аритмій і пояснення рішень моделей глибокого навчання. Результати дослідження реалізовані у вигляді інформаційної системи з клієнт-серверною архітектурою, що демонструє можливість практичного впровадження отриманих рішень у медичних установах. Особливу увагу заслуговує підхід до інтерпретації результатів класифікації, орієнтований на ознаки, якій використовуються у медичній практиці, що робить результати класифікації зрозумілі лікарю.

Наукові положення, що виносяться на захист, є обґрунтованими, новизна та практичне значення роботи підтверджуються результатами експериментів, проведених із дотриманням сучасних підходів до оцінювання методів та моделей штучного інтелекту. Усі результати отримані особисто автором, що засвідчує його високий рівень підготовки як дослідника.

Враховуючи науковий рівень, актуальність тематики, структуру, зміст та оформлення дисертаційної роботи, вважаю, що вона відповідає вимогам пунктів 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 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024).

Ураховуючи викладене, вважаю, Ковальчук Олексій Володимирович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки.

Рецензент:

Кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри КІС, Хмельницький
національний університет

Тетяна КИСІЛЬ

«Підпис Тетяни КИСІЛЬ засвідчую»
Проректор з наукової роботи ХНУ



Олег СИНЮК