

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na

OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Muhammad Farhan Safdar

która odbędzie się w dniu **10 października 2025 roku**, o godzinie **12:00** w trybie hybrydowym

Temat rozprawy:

“Developing Algorithms Using Artificial Intelligence to Analyze Electrocardiogram Signals”

Promotor: prof. dr hab. inż. Robert Nowak – Politechnika Warszawska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski – Politechnika Poznańska

prof. dr hab. inż. Dariusz Mrozek – Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. Khalid Saeed – Politechnika Białostocka

Obrona odbędzie się zdalnie na platformie MS Teams oraz stacjonarnie w Audytorium Centralnym Wydziału Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej w Warszawie, ul. Nowowiejska 15/19. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: dr hab. inż. Rafał Biedrzycki, email: rafal.biedrzycki@pw.edu.pl, do dnia 08.10.2025r. godz. 12:00.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Informatyka-Techniczna-i-Telekomunikacja/mgr-inz.-Muhammad-Farhan-Safdar>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej
prof. dr hab. inż. Jarosław Arabas

Analiza EKG za pomocą nowych metod wykorzystujących algorytmy sztucznej inteligencji

Streszczenie

Elektrokardiogramy (EKG) sygnały fizjologiczne rejestrowane w sposób nieinwazyjny, które okazały się praktyczne w diagnostyce klinicznej do oceny stanu serca. Sygnały te mogą być analizowane przez komputer, co wspiera diagnozę. W ostatnich latach znacznie wzrosła liczba zastosowań algorytmów sztucznej inteligencji, w szczególności rozwój modeli głębokiego uczenia (DL) pozwolił uzyskać wysoką jakość analiz automatycznych, co sprawiło, że takie metody zaczęły być szeroko stosowane do diagnostyki opartej na analizie sygnału EKG. Niniejsza rozprawa przedstawia serię publikacji powiązanych tematycznie omawiających wsparcie diagnostyki bazującej na sygnale EKG przez systemy wykorzystujące głębokie uczenie. W pracy jest położony nacisk na wstępne przetwarzanie sygnału EKG i udoskonalanie architektury modelu sieci neuronowej spłotowej (CNN).

Pierwszy rozdział opisuje właściwości sygnałów EKG omawiane z różnych perspektyw, w tym baz danych zawierających dane wzorcowe oraz aspekty związane z rejestrowaniem sygnału za pomocą urządzeń mobilnych, w celu promowania telemedycyny. Opisano tam techniki wstępnego przetwarzania danych, które pozwalają poprawnie budować modele przy niedostatecznej ilości danych. Omówiono istniejące metody znane z literatury, a także zakres dokładności klasyfikacji diagnostycznej EKG. Rozdział ten pokazuje obszary, które stanowią wyzwanie badawcze, obszary te wyznaczały kierunki badań opisane w poszczególnych publikacjach.

W drugim rozdziale omawiam analizę czasowo-częstotliwościową sygnałów EKG, zaproponowałem uproszczony czterowarstwowy model CNN w klasyfikacji binarnej. Redukcja szumu, filtrowanie częstotliwości i reprezentacja spektrogramu w porównaniu z sygnałami surowymi są oceniane na modelu CNN. Badany jest również wpływ licznych współczynników uczenia i częstotliwości próbkowania, ułatwiający wybór niezawodnych parametrów.

W kolejnym rozdziale pokazany jest nowy algorytm powiększania (augmentacji) danych, który pozwala poprawnie budować modele w przypadkach dysponowania zbiorem o małej objętości, albo zbiorem słabo zrównoważonym. Pokazana nowa metoda pozwala na generowanie nowych próbek za pomocą segmentacji i ponownego porządkowania. Zadbano o wydajność czasową i pamięciową rozwiązania jednocześnie uzyskując dobrze zróżnicowane rozszerzone sygnały w treningu modelu DL. Udoskonalona wersja opisanego w rozdziale algorytmu, uwzględniająca wykrycia pików typu R przed segmentacją, jest również wykorzystywana do generowania realistycznych rozszerzonych danych. Przedstawiona praca wykorzystwała model CNN do klasyfikacji binarnej i wielo-klasowej.

W czwartym rozdziale opisuję metody do konwersji 12-odprowadzeniowego klinicznego

EKG na jednodowodzeniowy EKG (SL-ECG), aby poradzić sobie z niedoborem danych SL-ECG. Przedstawione metody eliminują rozbieżności, w tym inną częstotliwość próbkowania, amplitudę i okres między danymi pochodzącymi ze standardowego sprzętu, a urządzeniami mobilnymi. Proponowane podejście jest zintegrowane z modelem CNN w klasyfikowaniu choroby migotania przedsionków i ułatwia efektywne trenowanie modelu DL oraz jego walidację.

W kolejnym rozdziale pokazuje nowy algorytm wykrywania odchyłań P-QRS-T w sygnałach EKG, który umożliwia przekształcenie niestrukturyzowanych danych sygnałowych w formę strukturalną, co pozwala na dalszą poprawę jakości systemów diagnostycznych. Planuje budowę nowych modeli uczenia maszynowego, zwłaszcza wykorzystujących duże modele językowe (LLM), do wzbogacania danych.

Przedstawione w pracy nowe metody osiągnęły konkurencyjną wydajność w klasyfikacji diagnostycznej EKG, charakteryzując się lepszą wydajnością, zwłaszcza w przetwarzaniu wstępnym.

Omówienie przedstawionych koncepcji i porównanie ich ze stanem literatury światowej wymagało analizy ponad 200 istniejących publikacji naukowych, w tym artykułów i książek. W trakcie studiów miało miejsce kilkaset dyskusji z promotorami, które pozwoliły opracować prototypowe oprogramowanie, przeprowadzenie eksperymentów numerycznych, analizę wniosków i opracowanie artykułów, które zostały opublikowane w renomowanych czasopiśmie naukowych. Proponowane metody i wytworzone oprogramowanie zostało rygorystycznie ocenione przy użyciu rzeczywistych danych udostępnionych przez firmę AliveCor i zestawu walidacyjnego China Physiological Signal Challenge dostępnego w publicznym repozytorium. Autor prezentował niektóre metody wraz z wynikami na seminariach i konferencjach międzynarodowych.

Słowa kluczowe: Elektrokardiogram; Automatyczna diagnostyka medyczna; Sztuczna inteligencja; Głębokie uczenie; Wzbogacanie danych; Spektrogramy; Urządzenie mobilne; Diagnostyka kliniczna;

Poznań, 30.05.2025 r.

Prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski
Politechnika Poznańska
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Instytut Automatyki i Robotyki
Zakład Układów Elektronicznych
i Przetwarzania Sygnałów

OCENA

rozprawy doktorskiej pt.: „*Developing Algorithms Using Artificial Intelligence to Analyze Electrocardiogram Signals*”

Doktorant **Muhammad Farhan Safdar, M.Sc.**

1 Ocena trafności doboru tematyki pracy, określenia problemu naukowego oraz celu i zakresu przeprowadzonych badań

Tematem ocenianej rozprawy doktorskiej, napisanej w języku angielskim, jest analiza (w tym analiza czasowo-częstotliwościowa) sygnałów elektrokardiograficznych (EKG) za pomocą spłotowych sieci neuronowych (CNN), dostosowanych do tego zadania przez Doktoranta. Zaproponował On uproszczoną, czterowarstwową strukturę spłotowej sieci neuronowej, usprawniając dzięki temu klasyfikacje diagnostyczne oparte na analizie sygnałów EKG.

Doktorant zajął się także przetwarzaniem sygnałów EKG: redukcją szumów, filtracją, próbkowaniem i reprezentacją sygnałów EKG za pomocą spektrogramów. Zaproponował także metody poszerzania danych EKG w celu poprawy zbieżności procesu uczenia sieci CNN.

Dzięki opracowanym i przetestowanym przez Doktoranta technikom można nie tylko skutecznie parametryzować sygnały EKG, ale także poprawiać jakość decyzji diagnostycznych podjętych na tej podstawie.

Badania przedstawione w ocenianej rozprawie zaliczam do bardzo ważnego i w pełni aktualnego obszaru, który w ostatnich latach nabiera coraz większego znaczenia w związku z upowszechnieniem badań EKG. Badania te są nie tylko mało kosztowne, szybkie i nieinwazyjne, ale także można je wykonywać w standardowych warunkach za pomocą łatwej do instalacji, także przenośnej a nawet noszonej przez pacjentów aparatury.

Tematyka rozprawy wraz z trafnie określonym problemem badawczym mają ważne aplikacje i ogromne znaczenie społeczne, ponieważ pozwalają na poprawianie jakości i dokładności procedur diagnostycznych dotyczących oceny chorób serca. Przypisanie rozprawy do dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja jest decyzją trafną.

Autor niestety nie sformułował ani wyraźnego celu badawczego rozprawy ani nie podał wyodrębnionej w tekście tezy naukowej. Można je jednak określić na podstawie zawartych w rozprawie informacji.

Uważam, że tytuł rozprawy trafnie określa zakres podjętych i przeprowadzonych badań. Dotyczą one, jak już to wcześniej zaznaczyłem, ważnego i w pełni aktualnego zagadnienia naukowego o dużych walorach aplikacyjnych. Doktorant przeprowadził skrupulatnie analizę zastanego stanu wiedzy oraz opisał własne pomysły. Do tekstu rozprawy włączył publikacje, które dobrze przedstawiają wyniki przeprowadzonych przez Niego prac badawczych.

2 Ocena treści, tekstu rozprawy, analizy źródeł i dorobku publikacyjnego Doktoranta

Recenzowana rozprawa, jak już wspomniałem, została napisana w języku angielskim. Jej tekst zawiera 144 strony i składa się z dwóch głównych części: raportu naukowego na str. 13–64 oraz tekstów pięciu publikacji na str. 75–144, tworzących dodatek B o nieco mylącym tytule „List of publications”, ponumerowanych kolejno P.1, ..., P.5.

Na stronie 3 są podziękowania (Acknowledgements). Na kolejnych stronach zostały zamieszczone streszczenia: w języku angielskim na str. 5 i 6 i w języku polskim na str. 7 i 8. Spis treści (Contents) znajduje się na str. 9–11.

Właściwa część tekstu rozprawy rozpoczyna się od str. 13, na której w rozdziale 1 pt.: „Introduction”, w punkcie 1.1 pt.: „List of research publications” Doktorant zebrał następujące informacje o pięciu publikacjach, których teksty znajdują się w dodatku B:

- P.1 Muhammad Farhan Safdar, Robert Marek Nowak, Piotr Pałka, „Pre-processing techniques and artificial intelligence algorithms for electrocardiogram signals analysis: A comprehensive review”, Computers in Biology and Medicine (2024), punktacja: 100, Impact Factor: 7.0, wkład własny: 70 %
- P.2 Muhammad Farhan Safdar, Robert Marek Nowak, Piotr Pałka, „A denoising and Fourier transformation-based spectrograms in ECG classification using convolutional neural network”, Sensors (2022), punktacja: 100, Impact Factor: 3.4, wkład własny: 70 %
- P.3 Muhammad Farhan Safdar, Piotr Pałka, Robert Marek Nowak, Ahmed Al-Faresi, „A novel data augmentation approach for enhancement of ECG signal classification”, Biomedical Signal Processing and Control (2023), punktacja: 140, Impact Factor: 4.9, wkład własny: 70 %
- P.4 Muhammad Farhan Safdar, Robert Marek Nowak, Piotr Pałka, Ahmed Al-Faresi, „Enhanced framework for single lead electrocardiogram signal analysis using deep learning with 12-Lead data”, Biomedical Signal Processing and Control (2024), punktacja: 140, Impact Factor: 4.9, wkład własny: 70 %
- P.5 Muhammad Farhan Safdar, Piotr Pałka, Ahmed Al-Faresi, Robert Marek Nowak, „Optimizing electrocardiogram signal augmentation for realistic synthetic data in deep learning model”, IEEE Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications Conference (2024), IEEE Xplore, punktacja: 20, wkład własny: 70 %.

Należy zwrócić uwagę na wysoką punktację tych publikacji: 100–140 punktów oraz duży, większościowy wkład własny Doktoranta, oszacowany we wszystkich przypadkach na 70 %.

Rozdział 1 zawiera ponadto punkt 1.2 pt.: „Thesis contributions”, w którym Pan Muhammad Farhan Safdar opisał swoje główne osiągnięcia przedstawione w rozprawie doktorskiej a polegające na opracowaniu technik wstępnego przetwarzania sygnałów EKG oraz na udoskonaleniu architektury splotowej sieci neuronowej w celu poprawy klasyfikacji diagnostycznych przeprowadzanych za pomocą sygnałów EKG.

Doktorant omówił także osiągnięcia zawarte w poszczególnych, wymienionych powyżej publikacjach i ich wzajemne relacje, które zilustrował poglądowo na rys. 1 i 2.

W publikacji P.1 Pan Muhammad Farhan Safdar przeprowadził przegląd różnych metod analizy sygnałów EKG na podstawie studiów literaturowych, poczynając od wykorzystania spektrogramów a skończywszy na uczeniu maszynowym i zastosowaniu głębokich sieci neuronowych.

Publikacja P.2 została zaś poświęcona analizie wykorzystania spektrogramów sygnałów EKG oraz zaproponowanej czterowarstwowej splotowej sieci neuronowej w celu redukcji rozmiaru danych, zapotrzebowania na pamięć i wielkości nakładów obliczeniowych.

W publikacjach P.3 i P.5 Doktorant przedstawił algorytm poszerzania danych w przypadku sygnałów EKG przedstawionych w postaci przebiegów w dziedzinie czasu.

W publikacji P.4 przedstawił zaś metodę translacji a ściślej dostosowania danych pomiędzy 12-to przewodową rejestracją kliniczną a uproszczoną rejestracją jedнопrzewodową.

W punkcie 1.2 Doktorant podał także wyniki porównań swoich osiągnięć z tymi, które wziął pod uwagę na podstawie przeglądu literatury, pokazując na rys. 3 i 4 wyższość zaproponowanych przez Niego rozwiązań pod względem rozmiaru modelu, czasów trenowania sieci neuronowej i zapotrzebowania na pamięć.

Rozdział 2 pt.: „Background” został poświęcony omówieniu historii elektrokardiografii (p. 2.1), analityki EKG (p.2.2) oraz zastosowaniu głębokiego uczenia w diagnostyce EKG (p. 2.3).

Rozdział 3 pt.: „Systematic review in ECG signal processing” jest bardzo krótkim (zawiera zaledwie 4 i pół strony) i pobieżnym (a nie systematycznym jak wynika z tytułu) przeglądem metod przetwarzania sygnałów EKG. Poza punktem 3.4 pt.: „Future directions” ma nadal charakter przeglądu literatury przedmiotu. W punkcie 3.4 Doktorant sformułował sześć kierunków przyszłych badań a w p. 3.4.1 poinformował, że w rozprawie zajął się czterema kierunkami bez szóstego, przy czym drugim tylko częściowo.

Podobnie krótki (4.5 strony) i podobnie pobieżny jest rozdział 4 pt.: „Signals spectral analysis”. Punkt 4.1 pt.: „Isolated frequencies and spectrograms” ma znów charakter przeglądu literatury. Natomiast w punktach 4.2 pt.: „Experimental validation” i p. 4.3 pt.: „Drawbacks and future work” Doktorant ponownie porównał swoje wyniki z wynikami znanymi z literatury.

Rozdział 5 pt.: „ECG data enrichment for deep learning”, także krótki i pobieżny (zawiera 5.5 strony), jest zwięzłym opisem zaproponowanej przez Doktoranta metody poszerzania danych EKG.

Podobnie zwięzły rozdział 6 pt.: „Clinical to single-lead ECG transitioning” (4.5 strony) jest poświęcony adaptacji 12-odprowadzeniowych danych klinicznych EKG do rozszerzania danych w przypadku uzyskiwania ich z urządzeń jedнопrzewodowych. Pomysł Doktoranta polega więc na rozwiązywaniu problemu niedoboru danych jedнопrzewodowych poprzez wykorzystanie poszczególnych kanałów w 12-odprowadzeniowych danych klinicznych.

Dwustronicowy rozdział 7 pt.: „Discussion” (str. 63 i 64) zawiera główne wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i omówienie otwartych problemów badawczych.

Bibliografia znajduje się na str. 65–71, zawiera ponad 90 nieponumerowanych pozycji literatury, ułożonych alfabetycznie według nazwiska pierwszego autora.

Dalszą, ostatnią częścią tekstu rozprawy są załączniki: krótki, jednostronicowy załącznik A pt.: „List of Symbols and Abbreviations” oraz omówiony już załącznik B zawierający pięć publikacji P.1, ..., P.5, których Doktorant jest współautorem.

Załącznik A zawiera większość zastosowanych w pracy nazw i skrótów, ale niestety nie wszystkie. Brakuje np. skrótu PPG (photoplethysmogram) ze str. 42. Spis ten, wbrew tytułowi, nie zawiera żadnych zastosowanych w pracy symboli. Gdyby było inaczej, to sądzę, że Pan Muhammad Farhan Safdar prawdopodobnie zauważyłby występujące w pracy konflikty oznaczeń i brak konsekwencji oraz staranności w oznaczeniach. Dzięki eliminacji tych usterek, jakość tekstu rozprawy uległaby znacznej poprawie.

Zarówno wykorzystana literatura jak i publikacje, których Doktorant jest współautorem, pozwalają na sformułowanie wniosku, że właściwie zapoznał się On ze współczesną literaturą przedmiotu i prawidłowo wykorzystał w rozprawie najnowsze osiągnięcia nauki i techniki dotyczące rejestrowania, przetwarzania i analizy sygnałów EKG oraz wykorzystania ich do celów diagnostycznych.

Biorąc pod uwagę artykuły naukowe P.1, ..., P.5, dorobek publikacyjny Doktoranta oceniam jako bardzo wartościowy i w pełni wspierający ocenianą rozprawę.

Kompozycja pracy budzi jednak zastrzeżenia. Rozdziały 3–7 są zbyt skrótowe i mało treściwe a ponadto mają dziwną strukturę. Na przykład punkt 3.2 zawiera tylko jeden podpunkt 3.2.1. Podobna sytuacja dotyczy punktu 3.3, zawierającego tylko jeden podpunkt 3.3.1 i punktu 3.4, zawierającego tylko jeden podpunkt 3.4.1.

Ponadto streszczenie rozprawy, zwłaszcza streszczenie w języku polskim na str. 7 i 8, jest przygotowane niestarannie i niepoprawnie. Po omówieniu zawartości rozdziału 2 Doktorant napisał „W kolejnym rozdziale pokazany jest nowy algorytm powiększania (augmentacji) danych”, podczas gdy w rzeczywistości ten algorytm jest przedmiotem rozdziału 5. Następnie Doktorant podał „W czwartym rozdziale opisuję metody do konwersji 12-odprowadzeniowego klinicznego EKG na jedno-odprowadzeniowy EKG (SL-ECG)”, podczas gdy w rzeczywistości zrobił to dopiero w rozdziale 6.

3 Ocena uzyskanych wyników i przeprowadzonych eksperymentów oraz poprawności ich przedstawienia

Do głównych zadań podjętych i wykonanych przez Doktoranta oraz do najważniejszych użytych przez Niego wyników należy, moim zdaniem, zaliczyć:

- opracowanie koncepcji uproszczonego, czterowarstwowego modelu CNN do klasyfikacji diagnostycznej sygnałów EKG
- analizę czasowo-częstotliwościową sygnałów EKG z wykorzystaniem spektrogramów
- przeprowadzenie badań wpływu redukcji szumów i filtracji sygnałów EKG w dziedzinie częstotliwości na poprawę wyników diagnostycznych
- opracowanie metody translacji a ściślej dostosowania danych pomiędzy 12-to przewodową rejestracją kliniczną a uproszczoną rejestracją jedнопrzewodową
- zbadanie wpływu rozszerzania danych EKG (zarejestrowanych jedнопrzewodowo) za pomocą danych zarejestrowanych 12-to przewodowo (w tym dopasowywania szybkości próbkowania) na szybkość i jakość procesu uczenia sieci neuronowej.

O ile stosowanie sztucznej inteligencji w diagnostyce medycznej nie budzi już raczej kontrowersji, bo w przypadku błędnej diagnozy odpowiedzialność ponosi lekarz lub konsylium lekarskie, korzystające z narzędzi AI, to jednak tworzenie nowych (fikcyjnych) przebiegów EKG w celu rozszerzenia danych jest już kontrowersyjne. Doktorant powinien więc uzasadnić, że zaproponowana przez Niego procedura nie prowadzi do zwiększenia ryzyka błędnych diagnoz.

Język pracy jest na ogół poprawny, ale niektóre określenia budzą zastrzeżenia. Najważniejszym niedociągnięciem jest używanie określenia „częstotliwość próbkowania” („sampling frequency”) zamiast „szybkość próbkowania” („sampling rate”) i mierzenie jej w hercach (Hz) zamiast w próbkach na sekundę (S/s). Poprawne określenie „Sampling rate” występuje co prawda na str. 46 i 47, ale i tak na str. 47 szybkość próbkowania jest podana w hercach a nie w próbkach na sekundę.

Muszę podkreślić, że jestem absolutnym przeciwnikiem stosowania nazwy „częstotliwość próbkowania” (nie mierzymy jej przecież w hercach a w próbkach na sekundę). Ta nazwa jest niepoprawna i prowadzi do nieporozumień. Należy bowiem rozróżniać pojęcia: „częstotliwość” (ang. frequency) jako właściwość sygnału i „szybkość” (ang. rate) jako właściwość procesu wykonywanego nad sygnałem i powstałego w wyniku tego procesu strumienia danych. Dlatego należy wyłącznie stosować określenie „szybkość próbkowania” i należy ją mierzyć w próbkach na sekundę (S/s), podobnie jak szybkość binarnego strumienia danych (bit rate) mierzy się w bitach na sekundę (b/s), a nie w hercach. Dzięki temu można jednoznacznie rozróżniać powszechnie stosowane pojęcia: „częstotliwość Nyquista” („Nyquist frequency”) i „szybkość Nyquista” („Nyquist rate”). Przez częstotliwość Nyquista rozumie się maksymalną częstotliwość widma sygnału dolnopasmowego, który można próbować z określoną szybkością, a przez szybkość Nyquista — minimalną szybkość, z którą można próbować sygnał dolnopasmowy o określonej maksymalnej częstotliwości widma. Skutkiem stosowania niepoprawnego terminu „częstotliwość próbkowania” jest więc niejednoznaczność pojęcia „częstotliwość Nyquista”.

Wyrażenia matematyczne są na ogół poprawne, ale Doktorant zupełnie niepotrzebnie przytoczył powszechnie znane definicje i zależności matematyczne jak np. definicję przekształcenia Fouriera (2.7) i definicje transformacji zafalowaniowych (wavelet transformations) (2.9)–(2.12), robiąc to nieściśle. Szerzej wybrane niedociągnięcia omówiłem w sekcji 4 pt.: „Uwagi szczegółowe”.

Mimo uwag krytycznych, dotyczących przygotowania tekstu rozprawy, osiągnięcia Doktoranta oceniam wysoko. Świadczą one nie tylko o Jego pomysłowości i dużej wiedzy w zakresie zastosowania sztucznej inteligencji do analizy sygnałów EKG, ale także o systematyczności, pracowitości i skuteczności w osiąganiu podjętych przez Niego zadań badawczych. Uzyskane przez Doktoranta wyniki zasługują więc na pozytywną ocenę. Mają nie tylko wartość poznawczą, ale przede wszystkim duże walory aplikacyjne. Doktorant rozwiązał postawione problemy, dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych.

4 Wybrane uwagi szczegółowe

Poniżej zebrałem niektóre uwagi szczegółowe, które nasunęły mi się podczas czytania tekstu rozprawy:

- str. 6 i 8: lista słów kluczowych nie powinna kończyć się średnikiem
- str. 21 (wiersz 12_d i wiele dalszych w całej pracy): zamiast „Where” powinno być „where”, niezrozumiałe jest wcięcie tekstu
- str. 24: wprowadzenie nazwy „angular frequency” zamiast po prostu „frequency” dla wielkości ω wyrażanej w (rad/s) jest nieprzyjęte w literaturze naukowej w języku angielskim — to jest w istocie częstotliwość podobnie jak f wyrażana w (Hz); zmienianie nazwy

wielkości wraz ze zmianą jednostki jest „maniera”, którą ja krytykuję — jabłka pozostają jabłkami czy je zważy się w kilogramach czy w funtach

- str. 26 (wiersz 4^g) i dalsze: transformacja zafalowaniowa (wavelet transformation) dotyczy reprezentacji „czas-skala” a nie „czas-częstotliwość”
- str. 26: wielkość $\psi_{s,\tau}(t)$ we wzorze (2.11) nie została zdefiniowana, poza tym „mother wavelet” to jest jedna funkcja (oznaczana zazwyczaj jako $\psi(t)$) a nie cała rodzina funkcji $\psi_{s,\tau}(t)$
- str. 27: wielkość i we wzorze (2.12) jest parametrem a we wzorze (2.9) i wcześniej we wzorze (2.7) jest jednostką urojoną — taka niekonsekwencja oznaczeń jest niedopuszczalna, poza tym we wzorze (2.12) zamiast

$$j^{2^i}$$

powinno być

$$j \cdot 2^i$$

- str. 27: we wzorze (2.13) zamiast

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

powinno być

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

- str. 27: we wzorze (2.14) oznaczenie shX powinno być wyjaśnione
- str. 28: wzór (2.15) jest błędny i powinien być gruntownie poprawiony, poza tym o co chodzi z przesuwaniem kolorów za pomocą szumu gaussowskiego?
- str. 29: we wzorach (2.16) i (2.17) czcionki powinny być poprawione, np. zamiast min i max powinno być $\min$ i $\max$
- str. 35: w tekście występują zarówno oznaczenia x_i, y_i jak i x_i, y_i
- str. 35: wielkość i we wzorach (2.24) i (2.25) jest indeksem a we wzorze (2.9) i wcześniej we wzorze (2.7) jest jednostką urojoną — taka niekonsekwencja oznaczeń jest niedopuszczalna.

5 Konkluzja

Podsumowując powyższą charakterystykę recenzowanej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Pan Muhammad Farhan Safdar zamieścił w niej wartościowe i oryginalne wyniki prac przeprowadzonych przez Niego pod kierunkiem Promotora rozprawy Pana Profesora Roberta Nowaka i Promotora pomocniczego Pana dr. Piotra Pałki.

Stwierdzam, że przedłożona praca spełnia wymagania stawiane przez stosowne przepisy rozprawom doktorskim i uważam, że Pan Muhammad Farhan Safdar powinien być dopuszczony do dalszych etapów procedury doktorskiej. Ze względu oryginalność i nowatorski charakter uzyskanych przez Niego wyników oraz Jego duży dorobek publikacyjny, można, mimo wad tekstu, w tym stosowanych określeń, rozważyć wyróżnienie tej rozprawy.



prof. dr hab. inż. Dariusz Mrozek
Katedra Informatyki Stosowanej
Politechnika Śląska w Gliwicach
ul. Akademicka 16
44-100 Gliwice

RECENZJA

rozprawy doktorskiej dla
Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
działającej w Politechnice Warszawskiej

Tytuł rozprawy: Developing Algorithms using Artificial Intelligence to Analyze Electrocardiogram Signals

Autor rozprawy: mgr inż. Muhammad Farhan Safdar

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Przedstawiona przez Pana Muhammad Farhan Safdar rozprawa doktorska składa się z cyklu powiązanych tematycznie publikacji wraz z towarzyszącym im opracowaniem (autoreferatem), który stanowi przewodnik po zrealizowanych pracach badawczych i szereguje wiedzę w omawianym obszarze. W ogólnym ujęciu rozprawa jest poświęcona przetwarzaniu i analizie sygnałów EKG z użyciem sztucznej inteligencji. Główne cele rozprawy koncentrują się wokół zagadnień reprezentacji sygnałów w procesie analizy danych EKG, ich wstępnego przygotowania, augmentacji, zrównoważenia i klasyfikacji z użyciem odpowiednio zaprojektowanych architektur sztucznych sieci neuronowych. Zarówno cele pracy, jak i motywacja prowadzonych badań w tym obszarze zostały sformułowane w sposób jasny i wyczerpujący. Charakter rozprawy określiłbym jako **eksperymentalny**, ponieważ Autor:

- zaproponował szereg usprawnień dla reprezentacji danych i ich multiplikacji, a także dla rozwiązań architektonicznych sztucznych sieci neuronowych,
- dla potwierdzenia słuszności przyjętych rozwiązań przeprowadził badania eksperymentalne na publicznie dostępnych zbiorach danych oraz danych powstałych w wyniku procesów augmentacji, które pozwoliły zweryfikować, iż opracowane algorytmy i rozwiązania mogą być z powodzeniem stosowane w analizie danych EKG i pozwalają na poprawę wydajności tych procesów analitycznych.

Lektura materiału pozwala mi stwierdzić, iż założone cele rozprawy udało się osiągnąć.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy Autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Analiza światowej literatury i bieżącego stanu wiedzy w omawianym obszarze zostały przeprowadzone w sposób satysfakcjonujący i świadczą o dostatecznej wiedzy Autora w tej dziedzinie. Analiza ta została przedstawiona w rozdziale 2 i 3 autoreferatu oraz w publikacji [P1] Autora, będącej elementem cyklu publikacyjnego będący głównym osiągnięciem rozprawy. Zawartość tych rozdziałów autoreferatu oraz publikacji [P1], które obejmują m.in. rys historyczny w obszarze elektrokardiografii, technik analizy sygnału EKG, technik augmentacji danych, alternatywnych rozwiązań dla klasycznych metod akwizycji sygnałów EKG w postaci urządzeń ubieralnych, analizy danych EKG z użyciem uczenia maszynowego i głębokiego, potwierdza, iż Autor posiada szeroką wiedzę w zakresie pierwotnych i bieżących trendów w zakresie tworzenia tego typu rozwiązań, a także zna ich zalety i słabości. W autoreferacie zacytowano 93, a w pracy [P1] 232 pozycje literaturowe, z których zdecydowana większość dotyczy wyżej wymienionych elementów stanu wiedzy. Rozdział 1 oraz rysunki 1-2 stanowią bardzo dobry wstęp teoretyczny do całości rozprawy, a do pojęć w nich zdefiniowanych (włączając wstęp) Autor nawiązuje w kolejnych podrozdziałach autoreferatu, jak również w treści poszczególnych artykułów głównego cyklu publikacyjnego. Szczególną uwagę zwraca Autor na problemy doboru sposobu reprezentacji danych, niskiej liczby dostępnych danych w publicznych repozytoriach dla umożliwienia budowy wiarygodnych modeli wnioskowania, niezrównoważenia zbiorów oraz dużej liczby parametrów modeli wnioskowania opartych na sztucznych sieciach neuronowych. Przeprowadzony przez Autora przegląd wiedzy w tym zakresie pozwolił mu w sposób jasny i przekonujący sformułować wnioski, które zdeterminowały przyjęcie odpowiednich rozwiązań algorytmicznych i obliczeniowych.

3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Na początku realizacji rozprawy Pan Muhammad Farhan Safdar zdefiniował kilka zadań, do których realizacji konsekwentnie dążył w swoich pracach badawczych. Dotyczyły one wydajnej jakościowo analizy sygnałów EKG z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i uczenia maszynowego. W swoich pracach Autor sięgnął do rozwiązań bazujących na odpowiednio zaprojektowanych architekturach konwolucyjnych sieci neuronowych (CNN) oraz przygotowanych i przetworzonych danych przy użyciu transformaty Fouriera i transformaty falkowej. Na podstawie lektury przedłożonych prac można stwierdzić, iż postawione w rozprawie zagadnienia zostały rozwiązane w sposób właściwy. Autor osiągnął to poprzez: 1) identyfikację słabości istniejących metod analizy sygnałów EKG opartych na analizie surowych szeregów czasowych oraz zaproponowanych w literaturze metod analizy, w tym różnych architektur sztucznych sieci neuronowych, w kontekście dostępnych formatów danych i realizowanego procesu analizy, 2) opracowanie własnych usprawnień i algorytmów, 3) badania eksperymentalne weryfikujące przydatność opracowanych metod z użyciem publicznie dostępnych zbiorów danych. Wyniki przeprowadzonych przez Autora rozprawy badań potwierdziły, iż założenia przyjęte podczas opracowania autorskich metod były słuszne i uzasadnione. W artykułach stanowiących główne osiągnięcie rozprawy przedstawiono porównanie osiągniętych wyników z wynikami istniejących i popularnych narzędzi powszechnie używanych przez specjalistów prowadzących podobne analizy danych i procesy klasyfikacyjne.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Przedstawiona rozprawa stanowi bardzo dobre uzupełnienie bieżącego stanu wiedzy światowej w zakresie prowadzenia wydajnych analiz opartych na metodach sztucznej inteligencji. Pan Muhammad Farhan Safdar zaproponował własne rozwiązania w zakresie architektury konwolucyjnych sieci neuronowych, przygotowania reprezentacji danych, ich puryfikacji, odszumienia, filtracji częstotliwościowej, segmentacji sygnału EKG i re-uporządkowania segmentów, a także przeprowadził proces ich wnikliwej oceny. Na rozprawę, oprócz autoreferatu, składa się pięć publikacji – jedna w renomowanym czasopiśmie *Computers in Biology and Medicine* (IF=7.0, wydawnictwa *Elsevier*), jedna w czasopiśmie *Biomedical Signal Processing and Control* (IF=4.9, *Elsevier*), a także dwa inne artykuły opublikowane w czasopiśmie MDPI i materiałach konferencji naukowej. Wszystkie prace są ze sobą ściśle powiązane, a Pan Muhammad Farhan Safdar jest pierwszym autorem, a jego udział w powstałej pracy jest większościowy. Charakteryzując krótko zawartość przedłożonych prac P1-P5 można stwierdzić, iż:

[P1] W pracy tej przedstawiono usystematyzowany przegląd technik przetwarzania i algorytmów analizy sygnałów EKG z wykorzystaniem modeli sztucznej inteligencji. Wskazano w nim dostępne zbiory danych EKG dla prowadzonych analiz, sposoby rejestracji sygnałów EKG z uwzględnieniem dokładnych technik klinicznych i popularnych rozwiązań ubieralnych o ograniczonych możliwościach i dokładności, metod przetwarzania i multiplikacji danych, wreszcie metod analizy danych EKG powstałych w ostatniej dekadzie, ze szczególnym naciskiem na metody oparte na uczeniu maszynowym i uczeniu głębokim, podejścia hybrydowe, a także metody oparte na uczeniu transferowym (*transfer learning*). Artykuł kończy przegląd środowisk i narzędzi symulacyjnych, z naciskiem na środowiska wieloagentowe.

[P2] W pracy tej przedstawiono opartą na splotowych sieciach neuronowych (CNN) metodę klasyfikacji sygnału EKG w kontekście wykrywania zapalenia mięśnia sercowego w obrębie przegrody przedniej (ASMI). Proces trenowania został tu poprzedzony odpowiednią reprezentacją danych w postaci spektrogramu powstałego w wyniku zastosowania krótkookresowej transformaty Fouriera. W pracy przedstawiono także algorytmy przygotowania danych obejmujące procesy odszumienia i filtracji częstotliwościowej. Badania eksperymentalne przeprowadzone z wykorzystaniem zbioru PTB-XL potwierdziły, że zaproponowane rozwiązanie może konkurować z najnowocześniejszymi architekturami sztucznych sieci neuronowych, a przyjęta forma reprezentacji danych w postaci spektrogramu pozwala poprawić efektywność procesu klasyfikacji, a dodatkowo redukuje potrzebne zasoby pamięciowe.

[P3] W pracy tej przedstawiono metodę augmentacji danych EKG opartą na segmentacji sygnału i relokacji fragmentów szeregu czasowego, tworząc w ten sposób nowy przebieg sygnału EKG o niskim podobieństwie strukturalnym w stosunku do przebiegu pierwotnego, ale zachowujący kluczowe jego cechy. Ponownie, jako danych wejściowych Autor użył zbioru PTB-XL. W badaniach eksperymentalnych zweryfikowano podobieństwo strukturalne sygnałów oraz podobieństwo ich

cech. Następnie przetestowano skuteczność analizy sygnału EKG z użyciem istniejących architektur sieci neuronowych bazujących na technice *transfer learning*, a także z użyciem własnej sieci konwolucyjnej, pokazując wyższość autorskich rozwiązań. Wreszcie zweryfikowano przydatność technik filtracji sygnału EKG dla dalszej analizy.

[P4] Praca ta przedstawia badania nad możliwością wykrywania nieprawidłowości w przebiegu sygnału EKG i problemu migotania przedsionków z wykorzystaniem prostszej formy rejestracji aktywności elektrycznej serca w postaci EKG jednodoprowadzeniowego oraz metod głębokiego uczenia. Zaproponowano w niej architekturę sztucznej sieci neuronowej trenowanej osobno na każdym z 12 kanałów sygnału EKG pozyskanego techniką 12-odprowadzeniową na podstawie danych z publicznych zbiorów danych, a następnie testowano możliwości detekcyjne na podstawie również publicznie dostępnych danych ze zbioru CinC-2017 pozyskanych przy pomocy mobilnego urządzenia AliveCor (1-kanałowego). W ten sposób przetestowano 12 niezależnych modeli i sprawdzono skuteczność treningową poszczególnych kanałów, dla późniejszego wykrywania schorzeń serca przy użyciu urządzeń EKG 1-odprowadzeniowych. W pracy tej wprowadzono także dodatkowe kroki przetwarzania danych w postaci ponownego próbkowania sygnału, normalizacji, wykrywania załamków R, segmentacji i dopasowania okna analizy, wreszcie głosowania z wykorzystaniem zwykłej większości głosów i średniego poziomu pewności.

[P5] W pracy tej przedstawiono ulepszoną metodę augmentacji danych EKG opartą na detekcji pików R, segmentacji sygnału i reorganizacji segmentów, eliminując wady poprzednio opracowanej metody, przedstawionej w pracy P3. Weryfikacji skuteczności dokonano w procesie wykrywania migotania przedsionków (AF) poprzez klasyfikację z wykorzystaniem opracowanej wcześniej architektury konwolucyjnej sieci neuronowej, posługując się trzema publicznie dostępnymi zbiorami danych osiągając zadowalające wyniki.

Zaproponowanie odpowiednich sposobów reprezentacji danych i ich wstępnego przygotowania, technik augmentacji i filtrowania, a także opracowanie specyficznych architektur konwolucyjnych sieci neuronowych wraz z elementami segmentacji i głosowania uważam za istotne osiągnięcie Autora i zaliczam do oryginalnych wyników przedstawionych w rozprawie. Wyniki przeprowadzonych prac badawczych zostały opublikowane w 5 artykułach bądź w liczących się w dziedzinie informatyki czasopismach (m.in. *Computers in Biology and Medicine*, 100 pkt. MNiSW, *Biomedical Signal Processing and Control*, 140 pkt. MNiSW), bądź w materiałach konferencyjnych. Świadczy to w mojej opinii o istotności podjętego problemu w rozwoju informatyki i inżynierii biomedycznej.

5. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Realizując pracę Pan Muhammad Farhan Safdar wykazał dobre opanowanie umiejętności przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Same idee zostały zaprezentowane w sposób dość jasny, sformalizowany i poparty przykładami, i co niezwykle istotne, poprzedzone szeroką analizą rozwiązań dotychczas zaprezentowanych na światowym forum naukowym. Oceny skuteczności rozwiązania

dokonano w oparciu o publicznie dostępne zbiory danych EKG. Wyniki oceny skuteczności opracowanych rozwiązań danej klasy zostały przeanalizowane i skomentowane w przedstawionych artykułach P1-P5 przedłożonej rozprawy pokazując, że poszczególne rozwiązania i modyfikacje dotychczasowych metod umożliwiają poprawę jakości i wydajności osiąganych wyników w porównaniu z wybranymi i dostępnymi metodami. Od strony redakcyjnej zarówno autoreferat, jak i prace P1-P5 są w większości napisane w dobrym stylu i czyta się je z łatwością, chociaż znalazłem w samym autoreferacie również kilka zdań, w których należałoby poprawić stylistykę wypowiedzi i gramatykę języka angielskiego.

6. Słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Przedstawione prace są bardzo ciekawe i dotyczą istotnych problemów budowania i działania algorytmów analizy sygnałów EKG wykorzystujących sztuczne sieci neuronowe, a także odpowiedniego przygotowania danych. Uzupełnia je autoreferat w języku angielskim, który zawiera najważniejsze konkluzje wypływające z przeprowadzonych prac badawczych. Nie znalazłem w tych dokumentach istotnych uchybień. Uwaga dotycząca poprawy stylistyki zdań w autoreferacie nie ma charakteru znacząco krytycznego i nie umniejsza znaczeniu osiągnięć Autora rozprawy. Mam natomiast kilka uwag i pytań, na które odpowiedź chętnie bym poznał:

Q1. W pracy P3 Autor mówi o minimalizacji zużycia pamięci w procesie przetwarzania danych, tymczasem ani w autoreferacie, ani w samej pracy P3 nie przedstawiono analizy złożoności tego algorytmu.

Q2. W pracy P2 Autor porównuje swoje rozwiązanie z pokrewnymi pracami opierając się na znanych miarach wydajności, jednakże powstaje pytanie, czy przytoczone prace pokrewne dotyczą tych samych obszarów analizy sygnałów EKG? tych samych procesów klasyfikacji? Podobnie ma się sprawa z Rys. 7 pracy P1.

Q3. W pracy P2 na Rys. 5 przedstawiono zużycie pamięci – jakiego procesu ono dotyczyło? trenowania sieci? W jaki sposób zmierzono zużycie pamięci?

Q4. Autor publikował swoje osiągnięcia w różnych czasopismach, dlaczego zatem przeprowadzony w pracy P1 przegląd literatury dotyczy tylko bazy Elsevier (pomijając m.in. takie bazy jak IEEE Xplore, SpringerLink i MDPI)?

U1. W autoreferacie niektóre wzory zostają podane bez jakiegokolwiek wprowadzenia (np. 2.9, 2.15, 2.16). Nie wiadomo jak je interpretować i w jakim celu zostały przytoczone.

U2. W autoreferacie, kiedy Autor opisuje historię uczenia maszynowego, nie wspomniano w ogóle postaci Johna Josepha Hopfielda, amerykańskiego fizyka, laureata Nagrody Nobla w 2024 roku za podstawowe odkrycia i wynalazki umożliwiające uczenie maszynowe z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Uważam, że przedłożona rozprawa doktorska Pana Muhammad Farhan Safdar wpisuje się w bieżące problemy informatyki i inżynierii biomedycznej. Opracowanie rozwiązań z dziedziny uczenia maszynowego

w analizie sygnałów EKG pozwoliło Autorowi na osiągnięcie dobrych wyników jakościowych przy zachowaniu satysfakcjonującej efektywności i wydajności czasowej w stosunku do istniejących rozwiązań opublikowanych w światowej literaturze, co przekłada się bezpośrednio na tworzenie lepszych rozwiązań w tym obszarze. W ten sposób zaproponowane rozwiązania rozszerzają spektrum istniejących metod stosowanych w analizie danych EKG z wykorzystaniem popularnych obecnie sztucznych sieci neuronowych. Potwierdzają to publikacje, których Pan Muhammad Farhan Safdar jest autorem, opublikowane przez wiodące wydawnictwa, takie jak *Elsevier* czy *IEEE*.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy

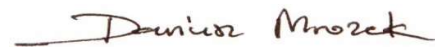
b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania

c/ spełniająca wymagania

d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem

e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Reasumując, bardzo dobre wyniki osiągnięte przez Pana Muhammad Farhan Safdar w trakcie realizowanych przez niego badań pozwalają potwierdzić, iż główne cele rozprawy przedstawione w rozdziale 1 i 2 autoreferatu. Wyniki badań pokazują, że techniki oraz metody zaproponowane przez Pana Muhammad Farhan Safdar mogą przyczynić się do znaczącej poprawy jakości procesów analizy danych EKG. Wartość tych metod została dostrzeżona przez środowisko naukowe, co potwierdzają opublikowane prace, wchodzące w skład przedstawionego cyklu głównego. Uważam zatem, że **przedstawiona rozprawa spełnia wymagania** stawiane rozprawom doktorskim określone w obowiązujących przepisach. Wnoszę zatem o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



prof. dr hab. inż. Dariusz Mrozek
Katedra Informatyki Stosowanej
Politechnika Śląska w Gliwicach

Prof. dr hab. inż. Khalid Saeed
Wydział Informatyki
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok
Tel. (+48-85) 746 9196
k.saeed@pb.edu.pl

Białystok, 2.06.2025 r.

RECENZJA rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Muhammada Farhana Safdara

z Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechniki Warszawskiej
zatytułowanej *Developing Algorithms Using Artificial Intelligence
to Analyze Electrocardiogram Signals*

Promotor:

dr hab. inż. Robert Nowak, prof. PW
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Niniejszą recenzję przygotowałem na zlecenie zawarte w piśmie z dnia 7.04.2025, które otrzymałem od profesora Jarosława Arabasa przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja Politechniki Warszawskiej na podstawie uchwały Rady nr 29/2025 z dnia 18.03.2025.

I. Omówienie zawartości rozprawy

Celem pracy doktorskiej mgr. inż. Muhammada Farhana Safdara było analiza i zaprezentowanie skutecznych metod wstępnego przetwarzania sygnałów elektrokardiograficznych (EKG) oraz udoskonalonej architektury modelu spłotowych sieci neuronowych. Autor przedstawia rozprawę doktorską jako serię publikacji o systemach wykorzystujących głębokie uczenie do badania sygnału EKG. Publikacje to jeden referat konferencyjny oraz cztery artykuły w czasopiśmie - jeden z nich nie był (i chyba nadal nie jest) opublikowany, o czym pisze sam doktorant (cytuje: *The thesis is structured into five thematic scientific contributions, consisting of four published articles and one currently submitted at a peer reviewed journal*). Nie jestem pewien, czy jest to dobry wybór, ponieważ artykuł mógłby zostać zrecenzowany negatywnie lub wymagałby ważnych zmian, a autor potraktował go jako jeden z ważnych elementów swoich osiągnięć naukowych, na podstawie którego były budowane dalsze etapy pracy. Niemniej w mojej recenzji będę traktował materiał rozprawy jako „Thesis work”, a nie „Thematic series of publications” - chodzi przede wszystkim o ewaluację pracy doktoranta, którą oceniam pozytywnie.

Podjęta tematyka pana Muhammada Safdara jest ważnym wyzwaniem dla badaczy naukowych zajmujących się komputerową analizą sygnałów EKG. Doktorant znalazł trafną lukę w literaturze i stanie wiedzy, którą uzupełnił z sukcesem - uzyskał skuteczne algorytmy, dzięki którym można osiągnąć metody wysokiej wydajności w automatycznej klasyfikacji diagnostycznej sygnałów EKG. Pan Muhammad zastosował sprawne metody wstępnego przetwarzania i usprawnionej architektury modelu CNN.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny i zawiera 71 stron. Praca została podzielona na siedem rozdziałów, bibliografię oraz dwa dodatki - listę symboli i kopie publikacji autora.

Rozdział pierwszy, jako wprowadzenie do rozprawy, poświęcony jest głównie informacji o wkładzie autora w stan wiedzy na temat analizy sygnałów EKG prezentowany przez pięć artykułów. Autor podaje swoje najważniejsze osiągnięcia naukowe, które zostały opublikowane i stworzą podstawę rozprawy.

W rozdziale drugim doktorant podaje historię pomysłu sygnału EKG i jego konstrukcji, użyte w pracy modele matematyczne oraz opis metod DL w analizie sygnałów EKG. W tym rozdziale autor podał motywację i tezę pracy, które zostały szczegółowo przestudiowane w artykułach P.1 do P.5.

W rozdziale trzecim rozprawy omówiono systematyczny przegląd przetwarzania sygnału EKG. Autor podał informację o repozytoriach danych oraz diagnostycznej sztucznej inteligencji w badaniu sygnału EKG.

W rozdziale czwartym autor omówił kwestię wyodrębniania i filtracji niepożądanych częstotliwości oraz podał informację o spektrogramach i metodach walidacji eksperymentów przy eliminacji niewykorzystanych częstotliwości.

Rozdział piąty był poświęcony wzbogacaniu danych sygnału EKG dla potrzeb metod głębokiego uczenia. Autor wyjaśnia stosowane algorytmy augmentacji danych służące temu celowi. Podaje również informacje o walidacji stosowanych metodologii oraz ważną informację o opisie P-QRS-T na sygnałach EKG stosowanych w artykułach.

W rozdziale szóstym autor przedstawia opracowane metodologie translacyjne w adaptacji danych klinicznych z 12. odprowadzeń na SL-ECG (*Single Lead ECG*). Wnioski końcowe oraz konkluzje są podane w dwustronnym rozdziale siódmym w sposób dyskusyjny - jako pytania i odpowiedzi. Całość pracy zamyka bibliografia, która zawiera 93 pozycje.

Struktura i zawartość rozprawy pokazują analizę publikacji doktoranta.

II. Opis zawartości publikacji – ocena pracy

Informacje o artykułach i ich zawartościach podam według kolejności wybranej przez autora – P.1-P.5. We wszystkich artykułach pan Muhammad jest pierwszym współautorem z udziałem 70%.

P.1: *Pre-processing techniques and artificial intelligence algorithms for electrocardiogram signals analysis: A comprehensive review. Computers in Biology and Medicine, Elsevier, 2024. IF=7.0, 100 pkt MNiSW.*

Jest to bardzo dobra i obszerna praca przeglądowa, zawierająca 232 pozycje: artykuły w czasopismach oraz materiały konferencyjne. Omówiono różne aspekty dotyczące sygnału EKG, w tym wstępne przetwarzanie, wzbogacanie danych urządzenia EKG do noszenia, rolę metod uczenia maszynowego i głębokiego uczenia w analizie sygnałów i modelowaniu opartym o agentach.

P.2: *Denoising and Fourier Transformation-based Spectrograms in ECG Classification using Convolutional Neural Network*. *Sensors*, MDPI, 2022. IF=3.4, 100 pkt MNiSW.

Nowością pracy jest użycie spektrogramów zamiast surowych sygnałów. Spektrogramy można łatwo zredukować, eliminując częstotliwości bez informacji EKG. Redukcja danych została przeprowadzona poprzez filtrację częstotliwości, przyjmując określoną wartość odcięcia. Te kroki sprawiają, że architektura modelu CNN jest prosta, co wykazało wysoką dokładność. Proponowane podejście zmniejszyło użycie pamięci i moc obliczeniową dzięki nieużywaniu złożonych modeli CNN. Najwyższą dokładność klasyfikacji i identyfikacji chorób serca, wynoszącą 99,06%, osiągnięto dzięki proponowanemu przez autora podejściu polegającemu na wnioskowaniu, iż spektrogramy są lepsze niż surowe sygnały do klasyfikacji EKG.

P.3: *A Novel Data Augmentation Approach for Enhancement of ECG Signal Classification*. *Biomedical Signal Processing and Control*. IF=4.9, 140 pkt MNiSW.

W tym artykule autor zaproponował algorytm augmentacji danych w celu ulepszenia zestawu danych sygnałów EKG o małej objętości oraz zarządzanie problemami nierówności danych (data imbalance). Prezentowana metodologia ma na celu zwiększenie klas mniejszościowych o niższym podobieństwie strukturalnym, ale wysokim podobieństwie cech między próbkami syntetycznymi i oryginalnymi. Nowością proponowanej metody jest wprowadzenie unikalnego rozszerzenia danych dla szeregów czasowych sygnałów EKG, które opiera się na prostej segmentacji, a następnie ponownym ich uporządkowaniu.

P.4: *Enhanced Framework for Single Lead Electrocardiogram Signal Analysis Using Deep Learning with 12-Lead Data*. Złożony do Submitted to *Biomedical Signal Processing and Control*.

Tak jak podałem powyżej, praca była złożona, a nie ma informacji o jej przyjęciu. Niemniej zawartość artykułu jest ciekawa i synchronizuje z pozostałymi artykułami. Autorzy proponowali nowatorskie podejście do rozwiązywania problemu niedoboru danych *Single Lead ECG* (SL-ECG) poprzez szczegółowe badanie 12-odprowadzeniowych baz danych klinicznych i wprowadzenie architektury wstępnego przetwarzania, która przekłada dane SL-ECG, zapewniając jednocześnie zgodność z danymi 12-odprowadzeniowymi. W pracy autorzy określają wiarygodność izolowanych odprowadzeń klinicznego EKG do treningu modelu DL dla określonego celu. Potem zastosują segmentację przedłużonego jednokanałowego sygnału EKG w celu rozwiązywania problemu pamięci.

P.5: *Optimizing Electrocardiogram Signal Augmentation for Realistic Synthetic Data in Deep Learning Model*. *Signal Processing Algorithms, Architectures, Arrangements and Applications* (SPA-2024 - konferencja IEEE Xplore).

W tym referacie autorzy zaproponowali nowe podejście do rozszerzania (augmentacji) sygnałów EKG, mające na celu wytwarzanie realistycznych sygnałów przy jednoczesnej optymalizacji wykorzystania pamięci i wymagań dotyczących zasobów. Metodologia opiera się na poprzednich pracach autorów nad rozszerzaniem sygnału EKG. Doktorant i jego zespół głównie zajmowali się ograniczeniami zaobserwowanymi w generowaniu sygnałów syntetycznych. Autorzy twierdzą, że ich algorytmy osiągnęły bardzo dobre wyniki, które podkreślają skuteczność i wydajność ich metody w zakresie zwiększania sygnałów EKG dla różnych zastosowań w opiece zdrowotnej i badaniach biomedycznych.

Artykuły stanowią oryginalne i ważne rozwiązanie problemu analizy i przetwarzania sygnałów EKG oraz wkład własny doktoranta w rozwój metod wstępnego przetwarzania sygnałów EKG. Przykładowe podejścia innych autorów w ramach stanu wiedzy zostały wybrane umiejętnie, a w szczególności w artykule P.1, gdzie analizowano ponad 200 prac naukowych. Wyniki eksperymentów autora wykazały, że przedstawiona metodologia zajmuje znaczące miejsce w stosunku do innych znanych metod pod względem uzyskiwanych wyników komputerowych badań sygnałów EKG, od akwizycji sygnału do klasyfikacji i rozpoznawania rodzaju chorób serca. Należy uznać, że autor wykazał w swoich artykułach, w ramach rozprawy doktorskiej, dobrą znajomość technik analizy sygnałów EKG i z sukcesem zrealizował wszystkie założone cele podane w rozprawie jako „Thesis contributions”.

Reasumując, należy uznać, że rozprawa napisana poprawnie, zaś istotne dla tematyki pracy zagadnienia zostały omówione w artykułach i opisane przez autora w rozprawie doktorskiej wyczerpująco. Wybrane metodologie i narzędzia są istotne, dokładne i niezbędne do osiągnięcia celu manuskryptu. Rozprawa napisana w języku angielskim, czyta się ją dobrze, chociaż nie brakuje błędów gramatycznych lub edytorskich. Nie zauważyłem poważnych braków merytorycznych, jednak są pewne aspekty, które wymagają dyskusji. Nie znalazłem istotnej informacji na temat badania sygnału EKG w sytuacji przed/ po zawałowej w ilustracjach w rozprawie ani w artykułach. Tu chodzi o kształt sygnału, który na przykład pokazuje bardzo niski poziom Q (1-2 dni po zawale) lub odwrócone T (kilka dni po zawale), itd. Czy takie kształty odbiegające od typowego sygnału były przeanalizowane i jaki miały wpływ na pracę opracowanych algorytmów? Chciałbym, aby autor ustosunkował się do tych uwag podczas obrony pracy doktorskiej.

III. Merytoryczne osiągnięcia doktoranta

Opublikowane prace są dobrym dowodem na to, że doktorant znalazł własną pozycję w stanie wiedzy. Pan Muhammad Safdar odkrył lukę w literaturze i wypełnił ją wynikami swoich prac naukowych. Stosowanie metod AI – jako metodologie sztucznej inteligencji wymaga zarówno dużych danych (*big data*), jak i dużej przestrzeni systemowej do pracy nad zebranymi danymi. Nie zawsze taka pamięć lub przestrzeń jest dostępna w narzędziach i systemach do wstępnego przetwarzania. Dlatego też pokonanie tego problemu jest

wyzwaniem. Doktorant opracował nowe metody technik wstępnego przetwarzania w taki sposób, aby można było przekształcić surowe sygnały EKG w formę o mniejszej pamięci bez utraty cech klasyfikacji pacjentów lub informacji o danych EKG. Autor zrealizował cele pracy i opracował następujące algorytmy i nowatorskie metody:

- Istotny przegląd analizy sygnałów elektrokardiogramu (EKG), od klasycznych do zaawansowanych technik, z naciskiem na uczenie maszynowe (ML) i głębokie uczenie (DL).
- Wykorzystanie surowych sygnałów EKG do spektrogramów w celu redukcji rozmiaru danych, które wymagają mniej pamięci i obliczeń w klasyfikacji chorób poprzez proponowany czterowarstwowy model CNN.
- Wprowadzenie unikalnego algorytmu augmentacji danych dla szeregów czasowych danych sygnału EKG, który opiera się na segmentacji i reorganizacji sygnału.
- Proponowanie i zademonstrowanie udoskonalonej wersji algorytmu augmentacji, która wykorzystuje i zutylizuje wykrywanie szczytów *R* przed segmentacją w celu generowania bardziej realistycznych próbek.
- Opracowanie modelu do rozróżnienia optymalnych odprowadzeń z 12-kanalowych sygnałów EKG na podstawie oceny predykcyjnej skuteczności jednoprzewodowego EKG przy użyciu wytrenowanych modeli DL.

Do implementacji algorytmów autor używał głównie Pythona z Jupyter Notebook i Net Logo.

Metodologie i narzędzia są istotne, dokładne i niezbędne do osiągnięcia celu pracy oraz rozwiązywania problemów analizy sygnałów EKG. Według mojej oceny uważam, że mgr inż. Muhammad Farhan Safdar osiągnął wyznaczony cel rozprawy doktorskiej, która wnosi nowe aspekty do nauk inżynierijno-technicznych.

IV. Wnioski końcowe

Wystawiam ocenę pozytywną rozprawie doktorskiej mgr. inż. Muhammada Farhana Safdara pt. "Developing Algorithms Using Artificial Intelligence to Analyze Electrocardiogram Signals" oraz stwierdzam, że praca spełnia wymagania i warunki nakładane przez ustawę o stopniach naukowych (art. 190 ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce -Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.). Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz osobisty wkład doktoranta w rozwój metod wstępnego przetwarzania sygnałów EKG oraz udoskonalonej architektury modelu splotowych sieci neuronowych. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie autora wymienionej rozprawy doktorskiej do jej obrony w celu uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Khalid Saeed