

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 spłotowej 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.

