

Prof. dr hab. inż. Celina Pezowicz
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska
ul. Łukasiewicz 7/9
50-371 Wrocław

Wrocław, 02.09.2022r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. SANDRY M. ŚMIGIEL „*Wybrane metody przetwarzania i analizy sygnałów elektrokardiograficznych w zastosowaniach telemedycznych*”

Promotor: prof. dr hab. inż. Tomasz Topoliński

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Tomasz Andrysiak, prof. uczelni

Podstawa opracowywania recenzji: pismo nr RDIB.002.28.2022 z dnia 4 lipca 2022 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Biomedyczna prof. dr hab. inż. Marka Gzika z prośbą o opracowanie recenzji.

1. ZAKRES ROZPRAWY

Choroby układu krążenia są główną przyczyną zgonów w krajach uprzemysłowionych, powodując blisko 18 mln zgonów rocznie, co stanowi ponad 31% wszystkich zgonów na całym świecie. Przyczynia się do tego m.in. nieprawidłowa dieta, nadciśnienie, stres oraz inne zmiany w stylu życia. W związku z tym ogromne znaczenie ma identyfikacja markerów do wczesnej diagnozy i wykrywania oraz szybkiego leczenia schorzeń układu sercowo-naczyniowego. Przewiduje się, że nawet 90% chorób układu krążenia można zapobiec dzięki odpowiedniej opiece zdrowotnej, w tym wczesnej diagnostyce oraz prawidłowej analizie i klasyfikacji sygnałów EKG. Elektrokardiogram (EKG) to okresowy sygnał, który odzwierciedla aktywność serca, i z którego uzyskuje się wiele informacji dotyczących prawidłowej i patologicznej pracy tego narządu.

Powszechnie znany sygnał elektrokardiograficzny (EKG) jest jednym z najczęściej używanych narzędzi klinicznych do oceny funkcji serca, a jego główną zaletą jest to, że jest nieinwazyjny i niedrogi. W praktyce klinicznej sygnał EKG jest zazwyczaj analizowany przez specjalistę, co wymaga wysokiego poziomu wiedzy, a sama interpretacja EKG jest czasochłonna i w dużym stopniu uzależniona od indywidualnej interpretacji. W erze rozwoju nowych technologii, w zastosowaniu w medycynie, działania zmierzają w kierunku skutecznej, a także szybkiej kwantyfikacji i analizy sygnału EKG, która pomaga klinicytom w ocenie stanu zdrowia pacjentów oraz zaistnienia zwiększonego ryzyka nagłego pogorszenia funkcji układu sercowo - naczyniowego. Coraz bardziej powszechna, jak i dostępna telemedycyna umożliwia szersze i skuteczne stosowanie aparatury służącej do prewencji kardiologicznej. Jednocześnie

prorowadzenie ciągłego nadzoru telemetrycznego niesie wiele wyzwań od strony technologicznej - dotyczącej głównie stabilnych warunków pomiaru (które powinny być prowadzone długoczasowego, tak jak ma to miejsce w powszechnie stosowanym Holterze), oraz użytkowej w tym: łatwości obsługi urządzenia przenośnego przez samego pacjenta oraz dobrej jakości łączności pomiędzy urządzeniem a miejscem prowadzenia analizy i interpretacji danych. Ilość ewidencjonowanych danych, a co więcej ich prawidłowy opis, stanowi obecnie jedno z większych wyzwań badawczo-wdrożeniowych.

Naprzeciw tym wyzwaniom wychodzi m.in. ogromny wzrost elektronicznej dokumentacji medycznej zawierającej usystematyzowane zbiory różnego rodzaju zdigitalizowanych danych medycznych wraz z nowymi narzędziami do efektywnej analizy tak dużej ilości gromadzonych informacji. W celu skutecznej i prawidłowo przebiegającej analizy sygnałów, takich jak EKG, stosowane są rozwiązania z wykorzystaniem narzędzi opartych na uczeniu maszynowym czy sztucznych sieciach neuronowych.

Co więcej techniki głębokiego uczenia są bardziej efektywne niż standardowe klasyfikatory pod względem dokładności i złożoności obliczeniowej, które to czynniki są bardzo istotne w ratowaniu życia w aplikacjach czasu rzeczywistego.

Należy podkreślić, iż pomimo istnienia wielu różnych metod i algorytmów, których zadaniem jest jak najlepsze dopasowanie mierzonych sygnałów elektrycznych serca do wzorców jego pracy w układzie prawidłowym, jak i arytmii nadal poszukuje się nowych rozwiązań umożliwiających szybką i pewną diagnostykę zaburzeń aktywności serca. Problem analizy potencjału elektrycznego serca wynika, poza wskazanymi już wcześniej utrudnieniami technologicznymi i użytkowymi, z cech osobniczych charakteryzujących każdego człowieka a co za tym idzie z różnego przebiegu sygnału EKG (nawet w przypadku tych samych jednostek chorobowych), szczególnie w zakresie czasu rejestracji, częstotliwości próbkowania czy szumów.

Z tego względu uzasadnione jest prowadzenie prac mających na celu wykorzystanie technologii nauczania maszynowego do jak najlepszego dopasowania, a co za tym idzie rozpoznawania zaburzeń pracy serca, a tym samym lepszego diagnozowania i leczenia osób z chorobami układu sercowo-naczyniowego.

Zagadnienie to jest ważne dla rozwoju nowoczesnych metod leczenia układu sercowo-naczyniowego człowieka. Rozwój cywilizacji przyczynia się z jednej strony do wydłużenia się życia człowieka, jednocześnie przyczyniając się do wzrostu zmian patologicznych układu krwionośnego. Jednocześnie częstym utrudnieniem jest szybki dostęp do lekarzy specjalistów, co potwierdza potrzebę rozwijania nowych generacji urządzeń i metod wspomagających diagnozowanie i leczenie schorzeń układu sercowo-naczyniowego.

Autorka swoje opracowanie przedstawiła łącznie na 182 stronach maszynopisu zawierającego tekst, tabele, rysunki i załączniki. Rozprawę podzielono na 10 rozdziałów zawierających: wprowadzenie, badania literaturowe, cel pracy, opis metod badawczych z opisem zastosowanych algorytmów analizy sygnałów oraz uzyskane wyniki i podsumowanie. Rezultaty zilustrowano 82 rysunkami i 39 tabelami. Autorka umiejętnie wykorzystwała różnorodne formy graficzne, aby zobrazować wyniki przeprowadzanych badań, co znacznie wzbogaca walory poznawcze przygotowanej rozprawy.

Dodatkowo praca zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz piśmiennictwa oraz załączniki ze szczegółowymi wynikami symulacji oraz wydrukami kodu źródłowego. Literatura liczy 275 pozycji, poprawnie dobranych, które wykorzystane są w pracy w sposób świadczący o dobrej znajomości podjętej tematyki. Na uwagę zasługuje przytoczenie w piśmiennictwie 4 prace autorstwa i współautorstwa Doktorantki, z zakresu realizowanej tematyki oraz jednego zgłoszenia patentowego.

We wprowadzeniu Doktorantka przedstawiła problematykę podjętą w rozprawie z zarysowaną genezą prowadzonych badań. W rozdziale tym zaprezentowano także tezę oraz szczegółowe cele i obszary badawcze. Jest to dość nietypowy układ jak na rozprawę doktorską. Całkowicie brak jest przesłanek, w tym uzasadnienia popartego dogłębną analizą stanu wiedzy z zakresu podjętej tematyki, aby sformułować tezę i pozostałe elementy planu badawczego już na tym etapie dysertacji. Nie pozwala to na przedstawienie logicznej ciągłości pracy naukowej, a sama geneza podjęcia badań (rozdz. 1.1.), przedstawiona przez Autorkę, to zdecydowanie za mało do wyznaczenia ostatecznych zadań, celów i tezy dzieła naukowego.

Rozdział drugi zawiera dane literaturowe z zakresu budowy i fizjologii serca człowieka, ze szczególnym uwzględnieniem generowanego przez niego sygnału eklektycznego. Przedstawiono w nim dokładną charakterystykę elementów zapisu krzywej pracy serca w czasie oraz scharakteryzowano główne zaburzenia pracy serca, które są podstawą do wykrycia prawidłowości następstw i odstępów czasowych sekwencji akcji przedsionków i komór, czyli tak zwana analiza rytmu serca. W skrócie omówiono metody i sposoby rejestracji sygnału EKG.

Kolejne rozdziały, trzeci i czwarty, poświęcone są szerokiej i dogłębnej analizie stanu wiedzy. Jednym z głównych problemów w zastosowaniu nowych technik telemedycznych jest problem przesyłu ogromnych zbiorów danych, stąd też w tym zakresie prowadzonych jest wiele prac badawczych dotyczących technik kompresji danych uzyskiwanych z zapisu sygnału EKG. Autorka dość pobieżnie scharakteryzowała stosowane algorytmy kompresji w tym algorytm Orthogonal Matching Pursuit (OMP), który został przyjęty przez Doktorantkę jako podstawowe narzędzie w kompresji i klasyfikacji sygnału elektrokardiograficznego. Wydawałoby się, że właśnie ta technika powinna być szczególnie wnikliwie zaprezentowana na tle innych algorytmów. Więcej miejsca poświęcono ważnemu problemowi uczenia maszynowego w rozpoznawaniu i klasyfikacji zmian zachodzących w pracy serca, z ciekawie zaprezentowaną analizą słów kluczowych występujących w publikacjach naukowych, a dotyczących tej tematyki badawczej. Przeanalizowano zagadnienie prowadzenia i transmisji sygnału EKG w zastosowaniach telemedycznych, wskazując najistotniejsze problemy, sposoby ich rozwiązywania i kierunki rozwoju w zdalnej transmisji danymi medycznymi.

Podsumowaniem obu omówionych rozdziałów jest rozdział szósty, który w ocenie recenzenta powinien zawierać krytyczną ocenę istniejących metod przetwarzania i analizy sygnału EKG. Dałoby to możliwość jednoznacznego uzasadnienia przyjętej tezy, a co za tym zastosowanego w badaniach algorytmu OMP oraz metody uczenia maszynowego.

Dalsza część rozprawy doktorskiej dotyczy badań własnych Autorki. W pierwszym etapie Doktorantka zaprojektowała własną, oryginalną koncepcję mobilnego rejestratora do telemonitoringu kardiologicznego umożliwiającego dozоровanie aktywności serca w sposób ciągły przez minimum dobę. W rozwiązaniu tym wykorzystano algorytm OMP w celu

kompresji sygnału EKG oraz klasyfikacji sygnału uwzględniającego ocenę przebiegu zapisu elektrokardiograficznego. W przedstawionych metodach badawczych zastosowanych w celu rozwiązania postawionego problemu naukowego, zaprezentowano bardzo interesującą i szeroką analizę istniejących baz danych medycznych dotyczących głównie danych elektrokardiograficznych zarówno prawidłowo pracującego serca jak i różnych jego zmian patologicznych. Do dalszych badań nad zagadnieniem kompresji sygnału EKG wybrano dane kliniczne pochodzące z bazy PTB Diagnostic ECG Database. Natomiast do badań nad klasyfikacją sygnału elektrokardiograficznego wykorzystano bazę PTB-XL Database.

Wyniki przeprowadzonych badań i symulacji przedstawiono w rozdziale ósmym. Pani magister Śmigiel szczegółowo opisała własne, nowatorskie algorytmy do kompresji sygnału EKG, detekcji sygnału EKG (tj. załamek P, zespołu QRS i załamek T) oraz algorytm służący klasyfikacji sygnału elektrokardiograficznego. W przypadku ostatniego zagadnienia wykorzystano dodatkowo klasyczne modele uczenia maszynowego oraz sieci neuronowe. Tak rozległy zakres przeprowadzonych badań ma swoje odzwierciedlenie w niezwykle obszernej i wyczerpującej prezentacji i analizie otrzymanych wyników przy uwzględnieniu ogromnej liczby różnych kombinacji analizowanych parametrów. Na tym etapie widoczna jest szeroka wiedza Autorki dotycząca podejmowanego tematu. Interpretacja uzyskanych rezultatów, przedstawiona przez Doktorantkę, świadczy o umiejętności formułowania wniosków i dojrzałości naukowej.

Podsumowanie ze wskazaniem dalszego kierunku badań nad pogłębioną analizą możliwości wykorzystania algorytmu OMP w sygnale elektrokardiograficznym oraz zbudowaniem i przetestowaniem urządzenia pomiarowego sygnału EKG, sformułowano w kolejnym, ostatnim rozdziale rozprawy doktorskiej.

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy, przedstawiona problematyka i zaproponowany sposób rozwiązania podjętych zagadnień pozwala stwierdzić, iż wybrany przez Doktorantkę temat jest w pełni uzasadniony oraz aktualny poznawczo i aplikacyjnie.

Recenzowana rozprawa mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria biomedyczna a podjęta w niej problematykę można zaliczyć do istotnego nurtu rozwoju współczesnej bioinżynierii.

2. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

W przedstawionej do recenzji rozprawie Doktorantka zaproponowała oryginalne podejście do rozwiązania problemu dotyczącego zagadnienia dopasowania i klasyfikacji mierzonego sygnału elektrokardiograficznego do danej jednostki chorobowej serca związanej z zaburzeniem rytmu jego pracy oraz możliwości kompresji mierzonych danych w celu wykorzystania w rozwiązaniach telemedycznych.

Na podstawie przeanalizowanej literatury dotyczącej podjętego problemu postawiono tezę, iż:

Możliwe jest zastosowanie algorytmu Orthogonal Matching Pursuit w kompresji i klasyfikacji sygnału elektrograficznego, na potrzeby IoT.

Wobec tak przedstawionego problemu Autorka wyznaczyła cele szczegółowe dotyczące przede wszystkim opracowania algorytmów kompresji sygnału EKG na potrzeby

transmisji danych medycznych z wykorzystaniem algorytmu OMP oraz opracowanie modeli klasyfikacji chorób serca przy wykorzystaniu sygnału EKG.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy chciałabym zaliczyć:

- zaprojektowanie oryginalnej koncepcji mobilnego rejestratora do telemonitoringu kardiologicznego umożliwiającego dozorowanie aktywności serca w sposób ciągły przez dłuższy czas;
- opracowanie algorytmu kompresji sygnału EKG, dzięki któremu możliwe jest przesyłanie danych przy wykorzystaniu rozwiązań opartych na transmisji LoRA;
- opracowanie własnego algorytmu detekcji sygnału EKG, w tym oryginalnego rozwiązania wykrywania załamka R i wyodrębnienia na jego podstawie zespołu QRS;
- opracowanie algorytmu służący klasyfikacji sygnału elektrokardiograficznego i własnych modeli klasyfikacji chorób serca;
- przeprowadzenie cyklu badań i symulacji własnych algorytmów na wybranych bazach danych medycznych PTB Diagnostic ECG Database i PTB-XL Database;
- umiejętne wykorzystanie różnych metod badawczych i analitycznych, w celu realizacji postawionych zadań badawczych;
- wyraźnie sformułowane cele badawcze i teza oraz konsekwentnie rozwiązane zadania szczegółowe.

Podsumowując tę część recenzji stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa zawiera cenne aspekty poznawcze. Pracą swoją Doktorantka włączyła się w bardzo ważny nurt badań nad rozwojem nowych technologii telemedycznych z zastosowaniem metod wykorzystujących komputerowe systemy wspomagania diagnostyki przy użyciu uczenia maszynowego i uczenia głębokiego. Doktorantka wykazała się gruntowną znajomością tematyki oraz dojrzałością w rozwiązywaniu bardzo złożonych problemów badawczych i naukowych.

Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny, w której rozwiązany został jeden z problemów badawczych, a którego wyniki mogą być z powodzeniem wykorzystywane w praktyce klinicznej, wspomagając proces komunikacji na drodze lekarz-pacjent i wsparciu prewencji rozwoju chorób serca.

3. UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

Chciałabym przedstawić pewne wątpliwości i uwagi krytyczne, które nasunęły mi się po zapoznaniu się z recenzowaną pracą. Najważniejsze z nich to:

1. W rozprawie brak jest krytycznej oceny obecnego stanu wiedzy z zakresu podjętego tematu, co umożliwiłoby wykazanie ewentualnych braków czy luk w stosowanych do opisu i analizy sygnałów elektrokardiograficznych metod i algorytmów, co jednoznacznie wskazywałoby na konieczność podjęcia dalszych badań nad rozpatrywanym zagadnieniem. Szczególnie brakuje, w moim przekonaniu, głębszego uzasadnienia wykorzystania metody OMP w prowadzonych badaniach/symulacjach. Lakoniczne stwierdzenie, że metoda OMP jest metodą „niedocenianą i niewykorzystywaną z perspektywy sygnału EKG” jest jednak zbyt słabe do tego aby

uzasadnić dlaczego to właśnie ten algorytm został wykorzystany w prezentowanej rozprawie doktorskiej.

2. Doktorantka w pracy pisze o wykonanych eksperymentach, podczas gdy praca prezentuje głównie analizy i symulacje matematyczne. Stąd też wydaje się, iż sformułowanie – badania eksperymentalne – są zastosowane trochę na wyrost.
3. Czy możliwe jest zastosowanie procesu optymalizacji w prowadzonych symulacjach, który umożliwiłby skrócenie czasu analizy w czasie rzeczywistym, bez zmniejszenia dokładności dopasowania w wykrywaniu zmiany rytmu serca?
4. Jaki jest procentowy wskaźnik dokładność dopasowania opracowanych i zastosowanych w rozprawie algorytmów w stosunku do innych metod wykrywania pików R, zespołu QRS i klasyfikacji zaburzeń pracy serca?
5. W pracy brakuje przeprowadzenia dyskusji naukowej uzyskanych wyników własnych na tle wyników prezentowanych w literaturze tematu. Oczywiście wyniki badań są szeroko przeanalizowane i ciekawie zinterpretowane, a w ostatnim rozdziale podsumowane, jednakże to nie zastąpi dyskusji, która wskazuje jak wyniki uzyskane w badaniach własnych prezentują się na tle innych autorów.
6. Pewnym ograniczeniem zrealizowanej pracy jest brak analizy zaproponowanych, własnych rozwiązań technicznych oraz algorytmów przetwarzania sygnału EKG przeprowadzonej na obiekcie rzeczywistym, a nie jedynie na danych zawartych w bazach danych medycznych. Jednakże uwzględniając dalsze plany naukowe Doktorantki, zarysowane w podsumowaniu, można wnioskować, iż takie badania zostaną w przyszłości wykonane, co w pełni zweryfikuje zaprojektowane urządzenie monitorujące sygnał EKG, jak i stworzony algorytm analityczny.
7. Doktorantka błędnie używa sformułowania - metodologia badawcza - zamiast metoda badawcza. Metodologia badawcza to dział nauki dotyczący różnych czynności poznawczych badań naukowych.

Przedstawione uwagi w niczym nie umniejszają pozytywnej oceny merytorycznej recenzowanej rozprawy doktorskiej.

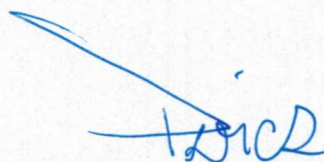
4. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując należy stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa zawiera cenne aspekty poznawcze w szeroko rozumianej dyscyplinie inżynieria biomedyczna. Praca wykonana została poprawnie, a jej podstawowy cel zrealizowany, tzn. wykazano, że zastosowanie algorytmu Orthogonal Matching Pursuit w kompresji i klasyfikacji sygnału elektrograficznego, na potrzeby IoT jest w pełni zasadne.

Praca będąc oryginalnym rozwiązaniem postawionego zadania badawczego stanowi autorski wkład naukowy w zakresie inżynierii biomedycznej opartej na nowych rozwiązaniach informatycznych i elektronicznych w rozwoju technologii telemedycznych. Dobór technik badawczych i umiejętne posługiwanie się nimi wskazuje na dobre przygotowanie Doktorantki do samodzielnego prowadzenia badań naukowych za pomocą nowoczesnych technik badawczych i umiejętności krytycznej analizy wyników.

Biorąc pod uwagę przedstawiony mi do zaopiniowania materiał, oryginalność rozwiązanego w rozprawie, istotnego zagadnienia naukowego, a tym samym fakt potwierdzenia umiejętności prowadzenia pracy naukowej i badawczej przez Doktorantkę uważam, że przedłożona rozprawa może służyć za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatce stopnia doktora nauk technicznych. Wobec spełnienia wszystkich wymogów odpowiedniej Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 (Dz.U. 2003 nr 65 poz.595) z późniejszymi zmianami wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Sandry Śmigieli do publicznej obrony opiniowanej pracy w dyscyplinie Inżynieria Biomedyczna.

Biorąc pod uwagę interdyscyplinarność rozprawy i oryginalne podejście do tematyki przewarżania i analizy sygnałów elektrokardiograficznych na potrzeby rozwoju nowoczesnej medycyny w tym telemedycyny, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "S. Śmigiel", is located in the center-right of the page. The signature is written in a cursive style with a long horizontal stroke extending to the left.