

## Recenzja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pana porucznika magistra inżyniera Wojciecha Lejkowskiego zatytułowana: "*Nowatorska metoda diagnostyki wybranych stanów patologii serca oparta na czasowo-częstotliwościowej analizie sygnałów fonokardiograficznych*". Recenzja jest sporządzona na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny AEE WAT prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dobrowolskiego przedstawione pismem WYCH/N/00388/2020 z dnia 16.07.2020. Recenzowana rozprawa została napisana pod kierownictwem pana prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dobrowolskiego w 2020 roku.

### **1. Zawartość rozprawy**

Przedstawiona rozprawa składa się z wprowadzenia, sześciu rozdziałów oraz podsumowania. Główniej treści towarzyszy spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis literatury. Dodatkowymi załącznikami są: dokumentacja rejestratora fonokardiogramów oraz podręcznik użytkownika. We wprowadzeniu skrótowo przedstawiony jest zakres rozprawy oraz jej teza w brzmieniu: *Możliwe jest opracowanie metody diagnostycznej przyporządkowującej zarejestrowane przypadki do klasy chory lub zdrowy z prawdopodobieństwem wystarczającym do współczesnych zastosowań medycznych, z wykorzystaniem sygnałów fonokardiograficznych rejestrowanych w typowych warunkach ambulatoryjnych*. Teza rozprawy jest dość ogólnikowa i nie odnosi się do konkretnych patologii a jedynie do klasyfikacji badanych osób do grupy zdrowych i chorych. W celu wykazania słuszności tak postawionej tezy Autor prowadził badania dotyczące poszukiwania cech dystynktywnych reprezentujących sygnał fonokardiograficzny, które będą wystarczające do rozróżnienia wspomnianych grup pacjentów za pomocą maszyny wektorów wspierających. W rozdziale 1. autor przedstawia potrzebę powszechnego badania przesiewowego chorób krążenia i znaczenie epidemiologiczne powszechnego ich występowania. Dodatkowo przedstawione są zalety wykonywania takiego badania w warunkach ambulatoryjnych i bez konieczności obsługi przez wykwalifikowany personel medyczny. W rozdziale tym przedstawione są też podstawy fizjologii krążenia, osłuchowych metod diagnostyki oraz struktura systemu diagnostycznego opartego na analizie sygnału fonokardiograficznego. W rozdziale 2. Autor przedstawia urządzenia pomiarowe w szczególności stetoskop akustyczny i analogowy elektroniczny, który będzie podstawą skonstruowanego autorskiego urządzenia cyfrowego. W rozdziale tym przedstawione są dalsze szczegóły konstrukcyjne tego urządzenia w szczególności wzmacniacz analogowy filtr i przetwornik analogowo-cyfrowy w torze rejestracji sygnału fonokardiograficznego oraz

w torze rejestracji elektrokardiogramu. W opisie tym szczególną uwagę zwraca bardzo precyzyjny projekt zasilacza nie tylko separującego galwanicznie zasilający port USB komputera od układów mających styczność z pacjentem, ale także separujący część analogową i cyfrową rejestratora. Jak zwykle w przypadku urządzeń stanowiących mikroprocesorowe konstrukcje autorskie, muszą one zostać uzupełnione przez współpracującą aplikację. Została ona wytworzona w środowisku Matlab z użyciem narzędzia do projektowania interfejsów użytkownika. W rozdziale 2. również znajduje się opis elektronicznego stetoskopu cyfrowego współpracującego z aplikacją komercyjną. Stetoskopy elektroniczne cyfrowy i analogowy zostały następnie porównane i po stwierdzeniu wyższej jakości sygnałów otrzymywanych z detektora cyfrowego (fabrycznego) autor zdecydował o jego stosowaniu w dalszych badaniach. Rozumiem, że ta decyzja była podyktowana doraźną potrzebą uzyskania wyników o wyższej jakości, choć jednocześnie szkoda, bo z punktu widzenia dyscypliny Automatyka Elektronika i Elektrotechnika, w której przygotowana jest mniejsza praca doktorska, opracowanie i dopracowanie autorskiego stetoskopu cyfrowego byłoby w moich oczach sporym osiągnięciem. W dalszej części rozdziału 2. Autor przedstawia jeszcze eksperyment polegający na rejestracji fonokardiogramów u pacjentów reprezentujących wybrane patologie. Do wybranych patologii należą: choroba wieńcowa, niewydolność, serca zawał mięśnia sercowego i nadciśnienie tętnicze. W wyniku przeprowadzenia opisanego eksperymentu zebrano bazę 921 sygnałów od 231 osób. Rozdział 3. jest poświęcony metodom automatycznej oceny jakości sygnałów fonokardiograficznych. Automatyczna ocena jakości sygnałów jest narzędziem pozwalającym uzyskiwać wiarygodne rezultaty w warunkach ambulatoryjnych, na przykład w domu pacjenta, w obecności istotnych w zakłóceń akustycznych. Metoda zaproponowana w tym rozdziale składa się z trzech zasadniczych kroków: pierwszym jest filtracja sygnału fonokardiograficznego, która polega na jego dekompozycji falkowej a następnie rekonstrukcji jedynie wybranych pasm częstotliwości, drugim krokiem jest wyznaczenie wartości 8 zaproponowanych parametrów jakościowych, a trzecim - wybór tych, które okażą się najbardziej dystynktywne dla sygnałów zakwalifikowanych jako "dobre" i "złe" przez eksperta. W trzecim kroku, stanowiącym klasyfikator jakościowy, Autor przebadał metodę analizy składowych głównych, metodę liniowej analizy dyskryminacyjnej oraz metodę maszyny wektorów wspierających. Użycie tej ostatniej metody okazało się najbardziej skuteczne i umożliwiło osiągnięcie stuprocentowej dokładności identyfikacji sygnałów o złej jakości. Następnie, w Rozdziale 4., Autor proponuje arbitralnie wybrane cechy sygnału, a w Rozdziale 5. poszukuje najbardziej dystynktywnych cech umożliwiających rozróżnienie fonokardiogramów należących do osób zdrowych i chorych. Bada w tym celu metodę Fishera, analizę składowych głównych, liniową analizę dyskryminacyjną oraz ewolucyjną selekcję cech osobniczych wykorzystującą algorytm genetyczny, która okazuje się być najskuteczniejsza. W rozdziale 6. Autor proponuje i przedstawia metodę klasyfikacji sygnałów fonokardiograficznych. Rozpoczyna ten opis od wielokryterialnej optymalizacji parametrów a następnie przedstawia klasyfikację i miary oceny klasyfikatorów. W dalszej części rozdziału Autor przedstawia także trzy klasyfikatory: analizę składowych głównych, liniową analizę dyskryminacyjną oraz sieć wektorów wspierających, a także zestawienie wyników charakteryzujących każdy z tych klasyfikatorów. Podobnie jak poprzednio, klasyfikator oparty na maszynie wektorów

wspierających okazał się najskuteczniejszy pozwalając na osiągnięcie dokładności na poziomie 96%. W podsumowaniu Autor stwierdza, że osiągnięte wyniki dowodzą prawdziwości postawionej tezy.

## **2. Znaczenie dokonań Autora dla rozwoju dyscypliny**

Tematyka rozprawy bardzo dobrze wpisuje się w obecne trendy poszukiwania nieinwazyjnych metod diagnostycznych do szybkiego badania przesiewowego osób cierpiących na patologie krążenia. Fonokardiografia nie jest metodą nowatorską, ale przeżywa ostatnio swój renesans dzięki zastosowaniu bezprzewodowych kardiomikrofonów (stetoskopów).

Do najważniejszych osiągnięć naukowych autora zaliczam:

1. zbudowanie autorskiej bazy sygnałów fonokardiograficznych i pozyskanie anotacji medycznej,
2. opracowanie metody uśrednienia tonów skurczowych w dziedzinie częstotliwości, zaproponowanie i przebadanie rozmaitych metod optymalizacji systemu, oraz
3. metodę oceny jakości zarejestrowanego sygnału fonokardiograficznego.

Podczas realizacji badań Autor wykazał się biegłością w implementowaniu i testowaniu automatycznych metod klasyfikacji, optymalizacji zestawu parametrów reprezentujących dane oraz walidacji tych metod w rzeczywistych warunkach. Rozprawa ma charakter implementacyjny, a przeprowadzone badania mogą przynieść konkretne zastosowania praktyczne.

Spis bibliograficzny zawiera 85 pozycji, wśród których 10 jest publikacjami współautorskimi Doktoranta. W siedmiu przypadkach są to publikacje konferencyjne a w trzech – publikacje w czasopiśmie. Publikacje są związane z tematyką rozprawy, te najważniejsze dotyczą oceny jakości sygnałów fonokardiograficznych oraz ich analizy w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej.

## **3. Zagadnienia do dyskusji**

Zasadniczym mankamentem rozprawy jest moim zdaniem niewystarczająco uzasadnione porzucenie własnej konstrukcji rejestratora cyfrowego, zwłaszcza, że w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika byłoby to osiągnięcie istotne. Drugim mankamentem jest stosowanie własnej bazy zapisów o niepełnej i niejasnej anotacji zamiast jednego z wybranych publicznych repozytoriów zapisów fonokardiograficznych, w których opis jest wielokrotnie zwalidowany. Przykład:

Classification of Heart Sound Recordings - The PhysioNet Computing in Cardiology Challenge 2016 <https://physionet.org/content/challenge-2016/1.0.0/>

Chciałbym zaproponować aby podczas obrony Doktorant skomentował następujące wątpliwości, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy:

- Na stronie 25. przedstawiona jest charakterystyka filtru antyaliasingowego. Wynika z niej wyraźnie, że dla częstotliwości próbkowania 10 kHz tłumienie filtru nie przekracza 10 dB, a zatem filtr nie spełnia swojej roli. Nietrudno bowiem wyobrazić sobie składową o częstotliwości przekraczającej 10 kHz i znacznej energii.

- Na stronie 36. na rysunku 2.24 Autor przedstawia przesterowany sygnał fonokardiograficzny domniemując, że przesterowanie następuje wewnątrz stetoskopu. Takie stwierdzenie, stanowiąc ostatecznie podstawę decyzji o porzuceniu własnej konstrukcji, powinno być znacznie lepiej uzasadnione. Można na przykład przeprowadzić badanie stetoskopu oraz badanie układu przetwornika analogowo-cyfrowego z użyciem sygnałów o różnych amplitudach.
- Na stronie 45. Autor przedstawia falkową filtrację sygnału. Jest to filtracja w dziedzinie czasowo-skalowej w wersji odwracalnej nakładająca znaczne ograniczenia na możliwe częstotliwości podziału. Jaki jest zatem cel podporządkowywania się tym ograniczeniom, skoro Autor nie korzysta z podstawowej zalety takiej filtracji, jaką jest zmiana parametrów częstotliwościowych w czasie? W szczególności chciałbym zwrócić uwagę, że jedną z metod realizacji transformacji falkowej jest filtracja z użyciem filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR), zatem rezygnacja z transformacji falkowej, ale pozostanie przy filtracji filtrami FIR umożliwia dowolne kształtowanie charakterystyki filtru i dobór częstotliwości granicznej.
- Na stronie 48. Autor przedstawia parametr jakościowy P1 jako stosunek energii sygnału po filtracji do energii sygnału pierwotnego. Ponieważ filtr eliminuje wybrane komponenty sygnału, energia sygnału po filtracji powinna być mniejsza niż energia sygnału pierwotnego, a zatem wynik P1 (w decybelach) powinien być ujemny. Tymczasem na stronie 50 wynik 9,31 dB oznacza sygnał "dobry", a wynik 12,92 dB - sygnał z wysoką zawartością szumu.
- Na stronie 53, przy definiowaniu parametru P3 Autor zakłada, że sygnał fonokardiograficzny jest quasi okresowy. To dość dalekie uproszczenie, w rzeczywistości okresowość jest dość silnie zaburzona przez tak zwaną arytmieję oddechową, której wpływy widać szczególnie podczas analizy zmienności rytmu serca HRV. Nie dziwi więc, że użycie parametrów typowych dla czasowej analizy HRV takich jak P5 i P6 okazuje się szczególnie skuteczne do wykrywania sygnałów złej jakości.
- Na stronie 66. Autor przedstawia spektrogram, za pomocą którego wskazuje przydatność analizy widmowej do wyboru cech dystynktywnych. Nie znalazłem niestety opisu w jaki sposób spektrogram ten został uzyskany. Przy okazji warto zwrócić uwagę na spotykany powszechnie błąd odnośnie nazewnictwa okien utworzonego od nazwisk: Richarda Hamminga ([https://pl.wikipedia.org/wiki/Richard\\_Hamming](https://pl.wikipedia.org/wiki/Richard_Hamming)) i Juliusa von Hann ([https://en.wikipedia.org/wiki/Julius\\_von\\_Hann](https://en.wikipedia.org/wiki/Julius_von_Hann)).
- W kontekście analizy widmowej poproszę jeszcze Autora o uzasadnienie zakresów pasma odpowiadających współczynnikom mocy od C9 do C 21, które zostały zostały zdefiniowane na stronie 73.
- Na stronie 88. w podsumowaniu rozdziału 5 Autor pisze, że każda z opisanych metod została przetestowana podczas tworzenia systemu, a najskuteczniejsza okazała się ewolucyjna metoda selekcji cech. Stwierdzenie takie wymaga uzasadnienia. W szczególności interesujące jest jakie dokładności selekcji uzyskano za pomocą

każdej z trzech metod i jakich parametrów użyto. Interesujące jest też czy optymalizacja wielokryterialna, o której Autor pisze na stronie 90, dotyczyła tylko parametrów opisujących widmo czy też wszystkich 25 parametrów podanych w tabeli 42.

- Na stronie 91. Autor opisuje podział posiadanej bazy danych na zbiór uczący i testowy. Poproszę o doprecyzowanie czy informacja o "dobrej" lub "złej" jakości sygnału pochodzi z automatycznego detektora jakości czy też jest to informacja podana przez eksperta podobnie jak informacja o stanie pacjenta.

Pod względem edytorskim praca napisana jest dość starannie, zawiera liczne rysunki, choć ich opis mógłby być bardziej przejrzysty. Wywód jest zwięzły i podparty aparatem matematycznym. Autor nie ustrzegł się szeregu usterek jak choćby stosowanie dyskursu osobowego, zwrotów żargonowych i pleonazmów takich jak na stronie 96. "...najbardziej optymalny wybór...".

Wymienione zagadnienia dyskusyjne i wskazane mankamenty nie umniejszają osiągnięcia naukowego, a moje spostrzeżenia formułuję tu przede wszystkim w celu wykorzystania ich przez Doktoranta do poprawy Jego przyszłych publikacji.

#### **4. Wniosek końcowy**

Doktorant poprawnie sformułował problem naukowy, istotny z punktu widzenia zastosowań fonokardiografii w przesiewowej wstępnej identyfikacji pacjentów z podstawowymi patologiami krążenia. Praca jest interesująca naukowo, a rozwijanie przedstawionych metod ma potencjał wdrożeniowy.

Przedstawiona rozprawa doktorska zatytułowana: „*Nowatorska metoda diagnostyki wybranych stanów patologii serca oparta na czasowo-częstotliwościowej analizie sygnałów fonokardiograficznych*”, spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (z dnia 14 marca 2003 roku) oraz Ustawy Przepisy wprowadzające ustawę Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (z dnia 3 lipca 2018 roku) w zakresie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. Recenzent wnioskuje do Komisji o **dopuszczenie rozprawy doktorskiej pana por. mgr. inż. Wojciecha Lejkowskiego do publicznej obrony.**

