

Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej

00-661 Warszawa, ul. Koszykowa 75

Recenzja rozprawy doktorskiej por. mgra inż. Wojciecha Lejkowskiego pt.  
**„Nowatorska metoda diagnostyki wybranych stanów patologii serca oparta na  
czasowo-częstotliwościowej analizie sygnałów fonokardiograficznych”**

promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Andrzej P. Dobrowolski, Wojskowa Akademia  
Techniczna

drugi promotor: dr hab. n. med. Robert Olszewski, prof. NIGRiR, Narodowy Instytut  
Geriatry, Reumatologii i Rehabilitacji

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy opracowania komputerowych metod wspomaganie diagnostyki wybranych stanów patologii serca na podstawie rejestracji i analizy sygnałów fonokardiograficznych. Tematyka prezentowanych badań skupia się zarówno na rejestracji sygnałów, zaprojektowaniu oprzyrządowania wspomagającego ten proces dla potrzeb ich cyfryzacji, oceny jakościowej pomiarów oraz finalnie wykrywania wystąpienia stanu patologicznego. Przeprowadzenie tych badań było możliwe dzięki współpracy Wojskowej Akademii Technicznej z zespołami z Wojskowego Instytutu Medycznego oraz Narodowego Instytutu Geriatry, Reumatologii i Rehabilitacji.

Rozprawa doktorska zawiera w początkowej części (oraz jako wtrącenia w praktycznie wszystkich rozdziałach) wprowadzania czytelnika w problematykę badawczą oraz wykorzystane narzędzia, a następnie przedstawia autorskie rozwiązania sprzętowe wspomaganie rejestracji sygnałów fonokardiograficznych, komputerowych metod oceny jakości rejestracji pod względem zakłóceń oraz finalnie system klasyfikujący pacjenta do grupy zdrowych lub z patologią serca. Przeprowadzone badania są spójne tematycznie i prowadzą do założonego rozwiązania. Praktycznym efektem przeprowadzonych badań było stworzenie mobilnego systemu do wspomaganie diagnostyki chorób serca.

Charakterystyka zawartości pracy:

Recenzowana rozprawa składa się z 6 rozdziałów, 2 załączników przedstawiających dokumentację rejestratora fonokardiogramów dla stetoskopu cyfrowego JABES oraz podręcznik użytkownika, w tym interfejs oprogramowania i liczy 125 stron. Bibliografia zawiera 85 pozycji literaturowych oraz bazodanowych. Na wstępie brakuje wykazu skrótów stosowanych w tekście oraz autor rozprawy mógł rozważyć zamieszczenie spisu rysunków oraz tabel.

Numerowane rozdziały rozprawy poprzedza spis treści, streszczenia oraz wprowadzenie. We wprowadzeniu zdefiniowana jest teza rozprawy oraz przedstawiona zawartość poszczególnych

rozdziałów. Autor wymienia ośrodki medyczne, z którymi współpracował podczas rejestracji sygnałów oraz opracowania rozwiązań i konsultacji wyników badań.

Pierwszy rozdział rozprawy zawiera krótki zarys fonokardiografii w aspekcie problemów występujących w trakcie tego badania diagnostycznego, przyjętych ogólnych założeń badawczych oraz kontekstu społecznego celów pracy.

Drugi rozdział przedstawia zasady pomiarów sygnałów fonokardiograficznych, w tym zakresy diagnostyczne dźwięków, budowę narzędzi pomiarowych (stetoskopów) oraz ich wersje cyfrowe wraz z problematyką rejestracji sygnałów. Omawiane w tym rozdziale są istotne parametry stetoskopów, problematyka przetwarzania sygnałów A/C oraz głównie autorskie rozwiązania projektowe rejestratora fonokardiogramów dedykowanego dla stetoskopu firmy JABES. Należy stwierdzić, iż już na tym etapie Autor rozprawy wykonał istotne prace inżynierskie oraz badawcze związane z zapewnieniem wysokiej jakości pomiarów w formie cyfrowej. Równolegle przedstawiony jest bardziej zaawansowany stetoskop firmy Littmann (zawierający własny układ konwersji A/C) oraz zaczerpnięte są z literatury porównania pięciu stetoskopów pracujących w różnych trybach. Przedstawiona jest posiadana i wykorzystywana w badaniach baza danych wraz z jej analizą statystyczną. Przedstawione wyniki obce oraz własne prowadzą Autora rozprawy do konkluzji, iż najważniejszym urządzeniem pomiarowym będzie stetoskop Littmann 3200.

Rozdział trzeci dotyczy problemu oceny jakościowej sygnałów fonokardiograficznych wraz z nich kwalifikacją do dalszych analiz. Autor wprowadza zagadnienia filtracji falkowej oraz definiuje zestaw cech będących podstawą do klasyfikacji jakościowej. Efekty klasyfikacji są przedstawione głównie graficznie, a użyte narzędzia opisane skrótowo z dość niefortunnymi odniesieniami do rozdziałów 5 oraz 6. Na tym etapie osiągnięciem Autora rozprawy jest opracowanie metody klasyfikacji sygnałów na nadające się do dalszej analizy oraz o zbyt niskiej jakości rejestracji.

W rozdziale czwartym Autor definiuje opracowany przez siebie zestaw cech dystynktywnych na przykładzie widma częstotliwościowego modelowego fonokardiogramu. Stanowią one dane wejściowe dla systemów klasyfikacyjnych omówionych w rozdziale szóstym. Przedtem jednak, w rozdziale piątym, zaprezentowane są badania nad selekcją cech najistotniejszych w procesie klasyfikacji. Omówione są metody Fishera, PCA, LDA, oraz ewolucyjna. Składają się one na opracowany przez Autora schemat redukcji cech wraz z oceną skuteczności różnicowania klasy pacjentów zdrowych i klasy pacjentów ze schorzeniami serca.

Rozdział szósty przedstawia podział danych pomiarowych, miary oceny jakości klasyfikacji, użyte klasyfikatory PCA, LDA oraz SVM oraz wyniki symulacji z podziałem na dane uczące i testujące. W tym rozdziale szerzej omówiony jest klasyfikator SVM z liniową funkcją jądra, który okazał się najskuteczniejszym narzędziem w badaniu. Ostatni, nienumerowany rozdział, zawiera podsumowanie rozprawy. Autor wskazuje na udowodnienie przyjętej tezy oraz punktuje własne osiągnięcia. Na końcu wymienione są inne, potencjalne kierunki badań, które mogą przyczynić się do poprawienia skuteczności opracowanego systemu rozpoznawania schorzeń serca w oparciu o sygnały fonokardiograficzne.

Ocena rozprawy doktorskiej:

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy rejestracji cyfrowej i zastosowania zaawansowanych metod komputerowych wielokryterialnej analizy sygnałów fonokardiograficznych. Głównym celem pracy było stworzenie systemu opartego na analizie częstotliwościowej sygnałów oraz metodach selekcji cech i klasyfikacji do wspomagania diagnostyki wystąpienia patologii serca. Autor pracy formułuje tezę w postaci: „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”. Przeprowadzone badania w zakresie przyjętych narzędzi realizują szczegółowe cele badawcze osiągając znaczące wyniki. Badania prowadzone są na wielu płaszczyznach analizy danych, a charakter rozprawy należy określić jako aplikacyjny.

Rozprawa doktorska bazuje w głównej mierze na rejestracjach sygnałów uzyskanych przy współpracy z Wojskowym Instytutem Medycznym oraz Narodowym Instytutem Geriatrii, Reumatologii i Rehabilitacji. Równocześnie, na wybranych etapach, wykorzystuje dane/analizy pochodzące z literatury światowej. Na bibliografię składają się 85 pozycji z zakresu medycyny, sztucznej inteligencji, przetwarzania sygnałów oraz własnych publikacji (13 pozycji, w tym z Przeglądu Elektrotechnicznego, konferencji krajowych i międzynarodowych) z tematyki rozprawy. Przytoczony przegląd literatury jest wyczerpujący, a pewne zastrzeżenia mogą dotyczyć braku pozycji C. Cortes and V. Vapnik, "Support vector networks," *Machine Learning*, vol. 20, pp. 273–297, 1995, którą należałoby przyjąć jako początek SVM.

Z punktu widzenia uzyskanych i zaprezentowanych w tekście analiz porównawczych ich poziom jest istotnie zmienny. W zakresie zaprojektowanych układów rejestracji sygnałów dla stetoskopu JABES zamieszczone na rys. 2.13, 2.14 oraz 2.15 wyniki pomiarów są wystarczające do dowiedzenia istotności i poprawności zaproponowanego układu. Jednakże porównywalnie skromna reprezentacja w zakresie pomiarów prezentowanych w pierwszej części rozdziału 3 nie pozwala na uzyskanie przez czytelnika pełnego wyobrażenia o zakresie problemu. Zdecydowanie bardziej obszerniej przedstawione są porównania zawarte w rozdziale 6 w zakresie klasyfikacji przypadków. Pełniejsze odniesienie do tej kwestii będzie w uwagach do pracy.

Jako oryginalny dorobek i główny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Autor wymienia:

- zbudowanie autorskiego rejestratora fonokardiogramów dla stetoskopu JABES,
- stworzenie we współpracy z WIM bazy danych sygnałów fonokardiograficznych,
- opracowanie autorskiej metody uśredniania tonów skurczowych w dziedzinie częstotliwości,
- wielokryterialną optymalizację systemu,
- zastosowanie algorytmu genetycznego do selekcji cech, w tym z autorską funkcją przystosowania,
- autorski klasyfikator oceny jakości sygnałów fonokardiograficznych,
- opracowanie algorytmu klasyfikującego o wysokich parametrach jakościowych.

Należy stwierdzić, iż wymienione rozwiązania są autorskie dla tego problemu badawczego. Autor dowodzi wysokiej znajomości zarówno narzędzi do rejestracji sygnałów, ich opisu numerycznego oraz klasyfikacji na równych poziomach, jak też badanych procesów chorobowych. Przedstawione w rozprawie rozwiązania oraz opracowany system „Rejestrator fonokardiogramów ver. 2.1” stanowią istotny wkład w praktyczne zastosowania techniki w medycynie. Zakres rozprawy najbardziej odpowiada dyscyplinie Elektronika. Przedstawione wyniki badań oraz ich interpretacja jest w znacznej mierze poprawna.

Uwagi merytoryczne do tekstu rozprawy:

W procesie oceny rozprawy pojawiły się pewne wątpliwości co do poprawności i zakresu niektórych analiz, zastosowanych metod oraz prezentacji wyników. Do uwag ogólnych zaliczam:

1. Przedstawiony w rozdziale 2 układ rejestracji sygnałów nie znalazł żadnego dalszego zastosowania w pracy. Uważam to za znaczny brak, gdyż weryfikacja systemu klasyfikacji sygnałów dla rejestracji innym stetoskopem potwierdziła lub wykluczyłaby jego użycie, a nie można zakładać, iż zawsze personel medyczny będzie miał dostęp do stetoskopu Littmann.
2. Widoczny brak analiz statystycznych, w tym wykorzystania zaawansowanych narzędzi jako punktów odniesienia dla opracowań autorskich. Charakterystyka danych powinna zawierać opracowanie statystyczne istotności różnic w liczebności poszczególnych klas chorobowych. Selekcja cech również mogła być zrealizowana metodami dostępnymi w pakietach statystycznych (np.: STATISTICA – analiza dyskryminacyjna), które to umożliwiają nie tylko ustalenie kolejności, ale też liczby cech użytych w zaproponowanym modelu decyzyjnym. Również wyniki z rys. 3.17 mogłyby zostać poddane testom statystycznym.
3. Rozwiązanie zaprezentowane na rys. 3.18 jest błędne. Cała analiza (rys. 3.18 – 3.20) powinna zawierać raczej kwestię marginesu separacji klas przy uwzględnieniu możliwych błędów klasyfikacji (dla przedstawionych danych był to jeden błąd).
4. Zdecydowanie właściwszym modelem analizy danych jest podział na zbiory uczący, weryfikujący oraz testujący, gdzie ten ostatni nie bierze udziału w optymalizacji parametrów systemu decyzyjnego.
5. W zakresie badań z rys. 3.25 nad automatyczną klasyfikacją jakości sygnałów brakuje porównania wyników z oceną eksperta. Na tym samym etapie badań mowa jest o selekcji najistotniejszych cech, a równocześnie stosowana jest sieć SVM dla wszystkich dziewięciu cech.
6. Analizując (na ile to możliwe) przebiegi zaprezentowane na rys. 4.6 odnoszę przeciwne wrażenie o możliwości różnicowania klas niż Autor rozprawy. Na tym etapie brakuje analiz tego problemu.
7. Przedstawienie niektórych metod jest powtórzone w różnych rozdziałach. Jest to istotny błąd redakcyjny. Uwaga ta dotyczy m.in. LDA, SVM, macierzy kontyngencji oraz niektórych wzorów (np. Fishera). Równocześnie samo SVM przedstawione i zastosowane jest tylko w postaci liniowej, co nie wyczerpuje badań w zakresie klasyfikacji.
8. Zakres uzyskanych wyników badań jest ograniczonych na końcowym etapie do tylko dwóch klas. Już sam tytuł rozprawy oraz przedstawione rodzaje patologii sugerują znacznie obszerniejszy zakres badań. Dlaczego nie przedstawiono wyników z podziałem na rodzaje patologii? Jaka była wymiarowość wektora cech użytego do zadania klasyfikacyjnego przedstawionego w rozdziale 6?

W opinii recenzenta wskazane by było odniesienie się do powyższych uwag w trakcie publicznej obrony doktoratu.

Do uwag natury edytorskiej zaliczam:

9. Brak wykazu skrótów i terminów.
10. Drobne literówki w tekście, np.: w pierwszym zdaniu Wprowadzenia, „stanową,” w Podziękowaniu, „ilość” zamiast „liczbę” lekarzy, i dalsze, na szczęście sporadycznie wytrącają czytelnika z toku myśli Autora rozprawy.
11. Obserwowane odchyłki w przebiegach przedstawionych na rys. 2.13 oraz 2.14 mogłyby być szerzej i wnikliwiej skomentowane, a określenie „mała amplituda” jest nieprecyzyjne.
12. Czy skala od 1 do 9 jest ośmiostopniowa? (s.32).
13. Jak pomiary wykonane na WIM miały wpływ na wartości w tabeli 2.2?
14. Skróty użyte na stronie 37 pochodzą raz od wyrazów/nazw w języku polskim, a raz w angielskim.
15. Oznaczenia we wzorze 3.2 są dość niefortunne (s.45).
16. Czy wzór 3.7 jest poprawny? (s.47).
17. Oznaczenia zmiennych we wzorze 3.17 powinny zawierać indeksy dolne (s.57).
18. Moim zdaniem odwołanie się do pozycji [50] na stronie 61, jak również lat siedemdziesiątych nie jest poprawne. Powstanie SVM wiąże się z inną pracą Vapnik-a i rokiem 1995.
19. Niestety moje postrzeganie kolorów oraz linii jest nieco inne niż Autora rozprawy i ani fioletowej, ani przerywanej linii nie jestem w stanie zidentyfikować na rys. 3.24 oraz (fioletowej) na rys. 3.25.
20. W tabeli 4.1 można było dodać odsetek poszczególnych klas w zbiorze danych.
21. Co oznacza odpowiednie przygotowanie tonów serca (s.68)?
22. W podsumowaniu 4.3 mowa jest o weryfikacji użyteczności analizy widmowej do oceny przypadków pod kątem występowania patologii układu sercowo-naczyniowego („w pierwszej kolejności”) – gdzie można ją znaleźć?
23. Nie zgadzam się ze stwierdzeniem, iż „PCA używa się głównie do redukcji zbioru cech...” (s.82).
24. Ile wynosiły wagi w funkcji przystosowania i jak zostały one dobrane? (s.86).

Większość błędów edytorskich nie wpływa na czytelność pracy, a tylko niektóre powinny zostać skomentowane przez Autora rozprawy. Wymienione w recenzji braki natury ogólnej nie przekreślają istotnego wkładu Autora pracy w uprawianą tematykę badawczą.

Konkludując, stwierdzam, iż recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Wojciecha Lejkowskiego pt. „Nowatorska metoda diagnostyki wybranych stanów patologii serca oparta na czasowo-częstotliwościowej analizie sygnałów fonokardiograficznych” w dziedzinie nauk technicznych, dyscyplinie Elektronika, spełnia wymagania wynikające z art. 179 ust.2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 r., poz. 1669) w związku art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r. nr 65, poz. 595 z późn. zm.) oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich,

postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora, i na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony.

Z poważaniem



Tomasz Markiewicz