

Prof. dr hab. inż. Gerard Cybulski
Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej
Wydział Mechatroniki
Politechnika Warszawska
ul. św. A. Boboli 8
02-525 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy : **Symetryczne i niesymetryczne parametry złożoności w wykrywaniu i różnicowaniu stanów fizjologicznych i patologicznych**

Tytuł w języku angielskim: **Symmetric and asymmetric complexity parameters in the detection and differentiation of physiological and pathological states**

Autor rozprawy: mgr inż. **Bartosz Biczuk**

Promotor rozprawy : **dr hab. Jarosław Piskorski, Prof. UZ**

Miejsce wykonania pracy: **Uniwersytet Zielonogórski, Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Technicznych, Instytut Fizyki**

Podstawa formalna opracowania recenzji rozprawy doktorskiej

Podstawę formalną opracowania recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Bartosza Biczuka zatytułowanej „**Symetryczne i niesymetryczne parametry złożoności w wykrywaniu i różnicowaniu stanów fizjologicznych i patologicznych**”, której promotorem jest **Dr hab. Jarosław Piskorski, Prof. UZ** stanowi pismo otrzymane od Pani **Dr hab. Marii Przybylskiej, Prof. UZ**, Przewodniczącej Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne UZ, w którym powiadomiła, że ww. Rada Naukowa powołała mnie na recenzenta tej rozprawy.

Struktura i zawartość rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. **Bartosza Biczuka** została sporządzona w języku polskim i jest 171 stronicowym opracowaniem o charakterze monografii, składającym się z 8 rozdziałów (*Wstęp, Wprowadzenie w tematykę badawczą, Opis teoretyczny, Metody badawcze, Cele, Wyniki, Wnioski, Podsumowanie*) oraz zawierającym liczącą 154 pozycje Bibliografię

w układzie numerowanym, w kolejności pojawienia się odnośnika w tekście pracy. Bibliografia została poprzedzona spisem rysunków (26) oraz spisem tabel (30).

Zasadnicza część pracy została poprzedzona dedykacją, streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz spisem treści.

W rozdziale „*Wstęp*” Autor zawarł krótkie wprowadzenie, w którym przedstawił historię powstania i analizy sygnału EKG oraz motywację do zajęcia się tematyką wykorzystania matematycznych metod oceny złożoności sygnałów do charakteryzowania modyfikacji rytm serca. Na końcu tego rozdziału Autor umieścił „Podziękowania” które zazwyczaj znajdują się w części początkowej rozprawy.

W rozdziale pierwszym (*Wprowadzenie w problematykę badawczą*) przedstawiono podstawy elektrokardiografii oraz opisano zaburzenie rytmu serca polegające na nieprawidłowym pobudzeniu przedsionków - migotanie przedsionków (AF). Zaprezentowano także podstawowy polisomnografii jako metody, która poza oceną zaburzeń oddychania, jest wykorzystywana do oceny zaburzeń snu oraz jego jakości. Omówiono cechy charakterystyczne poszczególnych faz snu w aspekcie analizy fizjologicznych parametrów opisujących rytm serca i jego modyfikacje.

Rozdział drugi (*Opis teoretyczny*) zawiera wprowadzenie do analizy zmienności rytmu serca (HRV) oraz asymetrii rytmu serca (HRA). W tej części pracy scharakteryzowano najistotniejsze parametry HRV oraz HRA wykorzystywane do ilościowej oceny regularności i dynamiki rytmu serca. Rozdział ten obejmuje również opis metod analizy serii monotonicznych szeregów odstępów RR, omówienie miar entropijnych, takich jak entropia Shannona oraz entropia z próby, które są stosowane jako miary złożoności sygnałów. Zawiera on również przegląd literatury dotyczącej badań nad fazami snu przy użyciu metod opartych o zmienność rytmu serca, jego złożoność oraz asymetrię. Podkreślono w nim również ograniczenia badań nad klasyfikacją faz snu opartych wyłącznie na analizie szeregu odstępów RR.

W trzecim rozdziale (*Materialy badawcze*) zawarto opis danych wykorzystanych w recenzowanej pracy. Skorzystano z zapisów holterowskich EKG pochodzących z trzech baz danych: z otwartych źródeł, z 30 minutowych zapisów zebranych w Katedrze i Klinice Intensywnej Terapii Kardiologicznej i Chorób Wewnętrznych Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu oraz zapisów polisomnograficznych zebranych w Oddziale Neurologii Szpitala w Zielonej Górze.

W kolejnym rozdziale (*Cele*) sformułowano pytania badawcze oraz przedstawiono cele, które mają zostać osiągnięte w toku przeprowadzonych analiz. Obejmują one analityczną

i numeryczną analizę własności parametrów HRV, wykorzystanie parametrów HRV oraz HRA do budowy modeli predykcyjnych, umożliwiających m.in. detekcję migotania przedsionków oraz ocenę faz snu a także rozwoju oprogramowania do obliczeń parametrów złożonościowych szeregów czasowych.

Rozdział piąty (*Wyniki*) zawiera omówienie efektów przeprowadzonych badań. W jego pierwszej części opisano wyniki analizy teoretycznego rozkładu serii monotonicznych oraz zastosowanie tej metody do badania szeregów czasowych wygenerowanych przy wykorzystaniu funkcji Weierstrassa, w tym po dodaniu asymetrycznego szumu. W kolejnej części rozdziału przedstawiono wyniki badań nad budową modelu przeznaczonego do klasyfikacji faz snu oraz przejść między fazami z wykorzystaniem parametrów HRA oraz rezultaty dotyczące detekcji migotania przedsionków, również oparte na metodach HRA.

Szósty rozdział (*Wnioski*) zawiera omówienie konkluzji z realizacji zadań badawczych.

W rozdziale siódmym (*Podsumowanie*) podsumowano uzyskane wyniki oraz przedstawiono ich znaczenie w kontekście ewentualnych przyszłych badań nad zastosowaniem parametrów HRV i HRA w modelach predykcyjnych dla oceny zaburzeń rytmu serca oraz jakości snu.

Uważam, że rozprawa ma prawidłowy układ stosowany w pracach eksperymentalnych i została poparta obszerną, starannie dobraną bibliografią, w której 22 ze 154 pozycji piśmiennictwa pochodzi z lat 2020-2025.

Ocena ogólna pracy i sylwetki naukowej Doktoranta

Tytuł rozprawy odzwierciedla zagadnienie badawcze jakim zajmował się Autor. Praca zawiera obszerny, bogato ilustrowany materiał, jej układ jest klarowny i nie odbiega od wyróżniających się prac doktorskich z zakresu nauk ścisłych, przyrodniczych lub inżynieryjno-technicznych. Rozprawa doktorska **mgr. inż. Bartosza Biczuka** ma charakter interdyscyplinarny, obejmujący zagadnienia z zakresu nauk fizycznych, analizy sygnałów, medycyny oraz inżynierii biomedycznej. Praca dotyczy zastosowania wybranych metod analizy złożoności szeregów zmian długości interwałów RR do detekcji migotania przedsionków oraz rozpoznawania faz snu na podstawie zapisów polisomnograficznych.

Warto podkreślić, że w dorobku Doktoranta znajduje się współautorstwo 3 publikacji w czasopismach z listy Web of Science. W 2 pracach Doktorant występuje jako pierwszy współautor w grupie 5 lub 6 osób). Indeks h dla Doktoranta wynosi 1, a prace były cytowane 4 razy. Najstarsza praca jest z 2022 roku.

Cel, zakres i znaczenie tematyki podjętej w rozprawie

Autor sformułował 7 celów pracy. W ujęciu syntetycznym, koncentrują się one wokół zbadania, czy parametry charakteryzujące entropię serii monotonicznych są w stanie efektywnie „(...) wykrywać asymetrie w szeregach czasowych oraz czy wyniki uzyskane przy ich użyciu są spójne z innymi metodami detekcji asymetrii, takimi jak parametry asymetrii rytmu serca(...)”. Ponadto, celem badań była „(...) ocena zdolności predykcyjnych miar entropijnych wyznaczonych z serii monotonicznych szeregu RR, wspomagana innymi miarami zmienności rytmu serca (...)”. Aby zrealizować wymienione zamierzenia Autor zaproponował teoretyczny model oparty na funkcji Weierstrassa z dodanym asymetrycznym szumem, co pozwoliło na ocenę wpływu asymetrii szeregów czasowych na badane parametry. Doktorant postanowił wykorzystać tę funkcję znaną, m.in. z zastosowań w analizie przebiegów zmian cen na rynkach oraz sejsmografii. Ponadto, Autor zamierzał sprawdzić czy badanie miar entropii umożliwia skuteczną klasyfikację faz snu oraz detekcję migotania przedsionków serca.

W swojej pracy Pan mgr inż. Bartosz Biczuk podjął się rozwinięcia zagadnienia ważnego z punktu widzenia analizy sygnałów biologicznych. Można przyjąć, że poszukiwanie coraz skuteczniejszych metod detekcji zaburzeń rytmu oraz predykcji zdarzeń o charakterze patofizjologicznym jest jednym z głównych zagadnień stojących przed twórcami algorytmów przeznaczonych do analizowania przebiegów EKG. Praca Pana mgr. inż. Bartosza Biczuka wpisuje się w nurt tych poszukiwań.

Spostrzeżenia oraz uwagi krytyczne dotyczące pracy

Rozprawę doktorską Pana mgr. inż. Bartosza Biczuka oceniam bardzo dobrze pod względem podjętej tematyki i zaangażowania w poszukiwanie metod badania trudnych do jednoznacznej oceny zjawisk z analizy zmienności rytmu serca. Nie mam zasadniczych zastrzeżeń co do wybranych metod badawczych, sposobu doboru danych do analizy, oryginalności i naukowego znaczenia przedstawionego materiału. Po zapoznaniu z pracą mam również przekonanie, że Doktorant prezentuje odpowiedni poziom wiedzy w dyscyplinie, w której przedstawił pracę oraz wystarczający w dyscyplinach pokrewnych, która to wiedza była niezbędna do klarownego przedstawienia osiągnięć na styku nauk fizycznych oraz medycyny.

Jeśli chodzi o wnioski, to Autor zauważył, że „(...) zarówno parametry wariancyjne, jak

i entropiczne są spójnymi miarami zdolnymi do wykrywania asymetrii w sygnałach, zgodnie z teoretycznymi przewidywaniami”.

Skuteczność modeli predykcyjnych wykorzystywanych do detekcji faz snu i przejść pomiędzy nimi była analizowana za pomocą tworzenia macierzy pomyłek oraz wyliczania wskaźników jakości (pole powierzchni pod krzywą - AUC, dokładność, precyzja, czułość, F1 score). Przykładowo, wskaźnik AUC zmieniał się w zakresie od 0.63 (dla przejścia N2-N3) do 0.89 (dla detekcji fazy N3). Podobnie była oceniana skuteczność modeli predykcyjnych w detekcji migotania przedsionków. Przykładowo, największą wartość AUC dla pojedynczego parametru obserwowano dla pRR3.25% (0.972) oraz pRR30 (0.959).

Za najcenniejsze osiągnięcie tej rozprawy doktorskiej uważam spostrzeżenie, że zastosowanie deskryptorów entropii dla modelu zbudowanego z parametrów pRR3.25% oraz pRR30 umożliwiającą poprawę skuteczności detekcji migotania przedsionków.

Dodatkowym walorem pracy, jest udostępnienie opracowanego, otwartego oprogramowania umożliwiającego bardzo szybkie obliczanie sum korelacyjnych oraz związanych z nimi parametrów entropijnych (ApEn i SampEn) a także przetwarzanie zapisów polisomnograficznych.

Doceniam również wartość studium literaturowego, które może zostać wykorzystane w przygotowaniu materiałów dydaktycznych lub publikacji przeglądowych.

Na podkreślenie, zasługuje także zoptymalizowanie oprogramowania, który to proces umożliwił skrócenie czasu wstępnej analizy zapisów polisomnograficznych z około 4 godzin do dwóch minut.

Z obowiązku recenzenckiego chciałbym wskazać na kilka innych niedopatrzeń i niezręczności dostrzeżonych w pracy, których przykłady pozwoliłem sobie dalej wymienić. Dotyczą one zarówno sposobu wyrażania myśli jak i warstwy edycyjnej.

Autor zaprezentował kilkakrotnie manierę podawania opisu naukowego, które niepotrzebnie, w mojej opinii, zestawiał ze sformułowaniami zawierającymi zwroty wartościujące. Przykładowo, na stronie 11 napotkałem zdanie - "Studium literaturowe stanowi istotny wkład badawczy w niniejszą rozprawę doktorską". Kolejny przykład pochodzi również ze Wstępu, podrozdział Struktura pracy, str. 11: "Rozdział ten stanowi zasadniczą część pracy i przygotowanie wyników opisanych w tym rozdziale stanowiło większość wysiłku badawczego niniejszego doktoratu". Inny znalazłem na str. 71, w Podrozdziale 5.1: "Jest to oryginalny wkład doktoranta". Wydaje mi się, że sformułowań tych, mógłby ewentualnie użyć recenzent...

Ponadto, nieco raziło mnie stosowanie liczby mnogiej w narracji dotyczącej treści rozdziału. Przykładowo, w Rozdziale 1 dostrzegłem następujące sformułowania: „W tej części rozdziału omówimy (...)”, „(...) skupimy się na (...)”, „Omówimy znaczenie (...)”.

W rozdziale 4 cel nr 1 (str. 70), w mojej opinii, powinien zawierać opis zamierzonej czynności np. „Opracowanie przeglądu piśmiennictwa dotyczącego...”
Ostatni cel (7) Autor sformułował jako „opracowanie metodologii badawczej służącej przystosowaniu sygnałów dostępnych w technologii komercyjnej do badań naukowych.”
Pozwolę sobie prosić o odpowiedź, czy rzeczywiście chodzi o metodologię, czy raczej o metodę...

Chciałbym również prosić o wyjaśnienie, czy we wzorze 2.13 nie powinno być σ^2 zamiast σ .

Dostrzegłem także, że *Spis treści* nie uwzględnia rozdziału zatytułowanego „*Wstęp*”. Ponadto, we *Wstępie*, w drugim akapicie, zamiast słowa „sympatycznego” wolałbym widzieć słowo „współczulnego”, zgodnie ze stosowaną polską terminologią medyczną.
Pozycja bibliograficzna nr 20 nie zawiera nazwy materiałów konferencyjnych Computing in Cardiology. Podobnie, pozycje 49 i 136 nie zawierają pełnej metryczki publikacji.

Ponadto, w omówieniu we *Wstępie* zamieniono rozdział trzeci z czwartym.
W rozdziale 5, w drugim akapicie jest zdanie niedokończone: „Podstawową motywacją do tych badań jest fakt, że metody HRA”. Ciąg dalszy zapewne zniknął w trakcie edycji.

Nie znalazłem również w pracy oświadczenia Autora o samodzielności przygotowania rozprawy, chociaż zapewne zostało złożone do dokumentacji.

Nieco zaskoczyło mnie pojawienie się podziękowań pod koniec wstępu. Zazwyczaj umieszcza się je jako osobną kartę na początku pracy, ale może Doktorant miał w tym szczególny zamysł...

W rozprawie nie zauważyłem spisu skrótów/akronimów, których umieszczenie znacznie ułatwiłoby jej czytanie i analizę.

Chciałbym podkreślić, że wymienione uchybienia lub niejasności nie podważają mojej ogólnej, pozytywnej opinii na temat przedłożonej do oceny dysertacji.

Wniosek końcowy

Uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego i dobrze wpisuje się w obszar dyscypliny **nauki fizyczne**, ze szczególnym uwzględnieniem aspektu biomedycznego. Zawartość opiniowanej pracy stanowi

również potwierdzenie wiedzy Doktoranta i umiejętności rozeznania w zakresie wyboru istotnej tematyki oraz sformułowaniu problemu badawczego, starannego doboru i przejrzenia piśmiennictwa, wyborze narzędzi do przeprowadzenia niezbędnych analiz, które uzupełnił o własne, oryginalne rozwiązania. Ponadto, Autor poprawnie przedstawił wnioski z badań formułując również krytyczne spostrzeżenia dotyczące ograniczeń Jego pracy. W mojej opinii, wykazał się naukową dojrzałością oraz umiejętnościami poznawania obszarów badawczych z pogranicza innych dyscyplin naukowych. Autor przeanalizował obszerny materiał badawczy, który, jak oceniam, będzie mógł być podstawą do kilku istotnych publikacji.

Konkludując, stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa **mgr. inż. Bartosza Biczuka**, spełnia wymagania Ustawy o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 (art.13 ust.1 i ust.2) wraz z późniejszymi zmianami, wraz z późniejszymi zmianami, a w szczególności Ustawą Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z 20 lipca 2018 roku. **Wnoszę również o przyjęcie tej dysertacji i dopuszczenie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**