

Dr hab. inż. Magdalena Kasprovicz, prof. ucz.

Wrocław, 03.04.2025

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Politechnika Wrocławska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Zastosowanie analizy sygnałów krążeniowo-oddechowych z rozszerzeniem o domenę przyczynową i informacyjną w celu poprawy oceny zdrowia

Autor rozprawy: mgr inż. Maciej Rosoł

Promotor: dr hab. inż. Marcel Młyńczak, prof. ucz.

Recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo RDNIB.001.4.2025 z dnia 24.02.2025 podpisane przez Prof. dr hab. inż. Agnieszkę Jastrzębską, Przewodniczącą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej, informujące o powołaniu mnie przez ww. radę na recenzenta pracy doktorskiej Pana mgr inż. Macieja Rosoła.

1. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy analizy współzależności funkcjonowania układu sercowo-naczyniowego (krążenia) i układu oddechowego (zwanej sprzężeniem krążeniowo-oddechowym) u zdrowych, w tym aktywnych fizycznie młodych osób oraz u pacjentów pediatrycznych z problemami kardiologicznymi. W szczególności Autor pracy koncentruje się na zbadaniu czy uwzględnienie parametrów niosących informację o aktywności układu oddechowego i parametrów oceny relacji przyczynowych między układem krążenia i układem oddechowym wraz z zastosowaniem technik „wyjaśnialnej” sztucznej inteligencji pozwalają na uzyskanie dodatkowych informacji diagnostycznych o stanie zdrowia człowieka.

Rozprawę doktorską stanowi zbiór 5 opublikowanych w latach 2022-2024 i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, co jest zgodne z zapisami art.187 ust. 3 Ustawy z dnia 20 lipca 2028 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668, z późn. zm.). W skład zboru prac wchodzi następujące pozycje:

1. M. Rosoł, M. Petelczyc, J. S. Gąsior, and M. Młyńczak, *Prediction of peak oxygen consumption using cardiorespiratory parameters from warmup and submaximal stage of treadmill cardiopulmonary exercise test*, PLoS One, vol. 19, no. 1, p. e0291706, Jan. 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0291706.
2. M. Rosoł, M. Młyńczak, and G. Cybulski, *Granger causality test with nonlinear neuralnetwork-based methods: Python package and simulation study*. Comput Methods Programs Biomed, vol. 216, 2022, doi: 10.1016/j.cmpb.2022.106669.
3. M. Rosoł, J. S. Gąsior, I. Walecka, B. Werner, G. Cybulski, and M. Młyńczak, *Causality in cardiorespiratory signals in pediatric cardiac patients*, 2022 44th Annual International

- Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 2022, pp. 355–358. doi: 10.1109/EMBC48229.2022.9871750.
4. M. Rosoł, J. S. Gąsior, K. Korzeniewski, J. Łaba, R. Makuch, and M. Młyńczak, *Prediction of the duration of maximal exercise test in professional adolescent football players based on the cardiorespiratory signals – a pilot study*, 2024 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2024, pp. 1–4. doi: 10.1109/EMBC53108.2024.10782255.
 5. M. Rosoł, J. S. Gąsior, K. Korzeniewski, J. Łaba, R. Makuch, B. Werner and M. Młyńczak, *Machine Learning Classification of Pediatric Health Status Based on Cardiorespiratory Signals with Causal and Information Domain Features Applied—An Exploratory Study*, J Clin Med, vol. 13, no. 23, 2024, doi: 10.3390/jcm13237353.

Prace są wieloautorskie, co jest powszechne i nieuniknione zważywszy na interdyscyplinarny charakter badań. Dwie z pięciu prac zostały opublikowane w recenzowanych artykułach pokonferencyjnych, pozostałe trzy prace są opublikowane w czasopismach o dobrej i bardzo dobrej randze naukowej. We wszystkich ww. pracach Pan Maciej Rosoł jest pierwszym autorem i zgodnie z załączonymi oświadczeniami współautorów (rozdział 11 pracy doktorskiej) jego wkład autorski był znaczny, wynosił od 75-80% i polegał, między innymi, na konceptualizacji, opracowaniu metodologii, gromadzeniu i obróbce danych, ich analizie, napisaniu oprogramowania, przygotowaniu pierwszej wersji manuskryptu, jego edycji i recenzji, a także przygotowaniu rysunków. Praca doktorska napisana jest w języku polskim i składa się z *Podziękowań*, *Streszczenia* w języku polskim i angielskim, *Wykazu stosowanych skrótów i oznaczeń*, *Spisu treści*, *Wykazu publikacji stanowiących cykl prac*, *Wstępu*, *Omówienia* (w pięciu rozdziałach) wyników przedstawionych w ww. publikacjach, *Podsumowania*, *Bibliografii* składającej się 103 aktualnych pozycji literaturowych. Dodatkowo załączona została *Opinia Komisji Bioetycznej przy Warszawskim Uniwersytecie Medycznym*, *Oświadczenia współautorów publikacji* o wkładzie autorskim Pana Macieja Rosoła w powstawanie ww. artykułów, *Wykaz pozostałych prac*, których Pan Rosoł jest współautorem oraz wydruki publikacji wchodzących w cykl artykułów będących podstawą pracy doktorskiej. Układ pracy jest logiczny i czytelny.

W tym miejscu przytoczę spersonalizowane wskaźniki naukometryczne dot. powyżej wymienionych prac, potwierdzające znaczenie prowadzonych przez Doktoranta badań naukowych takie jak: liczba cytowań – łącznie: 103, wchodzących w skład rozprawy doktorskiej: 36 (bez autocytowań, według bazy Scopus, na dzień 09.04.2025) oraz Indeks Hirscha – 3, które uznają za bardzo dobre na obecnym etapie rozwoju kariery naukowej Doktoranta.

2. Merytoryczna charakterystyka pracy i znaczenie podjętego tematu badań dla rozwoju dyscypliny Inżynieria biomedyczna

A) jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrywane w pracy i czy teza pracy została dostatecznie jasno sformułowana przez autora

W pracy sformułowano jedną ogólną hipotezę brzmiącą następująco „uwzględnienie informacji o aktywności oddechowej i parametrach z domeny przyczynowej lub informacyjnej dla

sygnałów krążeniowo-oddechowych pozwala uzyskać dodatkową wartość diagnostyczną w ocenie stanu zdrowia”.

Natomiast cel określono jako „zbadanie istotności aktywności oddechowej i parametrów z domeny przyczynowej lub informacyjnej dla sygnałów krążeniowo-oddechowych w kontekście stanu zdrowia osoby badanej. W podsumowaniu Wstępu Autor dodatkowo doprecyzowuje cel jako *dążenie do opracowania nowych narzędzi i metod analitycznych, które umożliwiają bardziej precyzyjną ocenę stanu zdrowia, wspomagają proces diagnostyki i przyczyniają się do personalizacji opieki zdrowotnej.*

W mojej ocenie należałoby określić cele szczegółowe pracy, których realizacja doprowadziła do weryfikacji postawionej hipotezy badawczej. Opublikowane artykuły miały określone różne cele (predykcja wartości szczytowego pochłaniania tlenu, predykcja czasu trwania testów wysiłkowych, opracowanie narzędzia do wykrywania związków przyczynowych o złożoności większej niż liniowa i zastosowania go do analizy sygnałowych danych medycznych pochodzących z różnych populacji (pacjenci kardiologiczni, osoby zdrowe, sportowcy)). Niewątpliwie prace te mają wspólny mianownik, jakim jest uwzględnienie parametrów niosących informację o aktywności układu oddechowego i/lub parametrów oceny relacji przyczynowych między układem krążenia i układem oddechowym w podjętych badaniach. Niemniej jednak pomocny byłby dedykowany podrozdział, w którym Autor jasno i precyzyjnie określiłby cele pracy i ich powiązania z postawioną hipotezą badawczą.

Pomimo tego niedociągnięcia, którego uzupełnienie poprawiłoby klarowność związku między zakresem prac badawczych, osiągniętymi celami i weryfikacją postawionej hipotezy, **uwzględniłem, że zagadnienie badawcze i problematyka pracy zostały dobrze wyjaśnione, a hipoteza badawcza jest sformułowana poprawnie.**

B) czy tematyka rozprawy jest aktualna i ważna

Zaproponowane metody badawcze i uzyskane wyniki mogą znaleźć zastosowanie w praktyce klinicznej, szczególnie w diagnostyce i rehabilitacji pacjentów z zaburzeniami kardiologicznymi czy niewydolnością oddechową (np. w wyniku zachorowania na COVID-19), a także mogą być przydatne przy ocenie wyników osiąganych przez sportowców i do opracowywania indywidualnych planów treningowych. Uwzględnienie parametrów relacji przyczynowych między układem krążenia i układem oddechowym poszerza możliwości diagnostyczne i terapeutyczne dostarczając nowych, bardziej precyzyjnych informacji o stanie zdrowia osoby badanej. **Uważam, że uzyskane wyniki mają wydźwięk zarówno praktyczny jak i poznawczy, a tematyka badawcza podjęta przez Autora pracy jest aktualna i ważna.**

C) czy postawiony problem badawczy został rozwiązany i czy użyte metody badawcze były prawidłowe

Zgodnie z postawioną hipotezą badawczą Autor podjął się wykazania, że uwzględnienie informacji o aktywności układu oddechowego i parametrach z domeny przyczynowej lub informacyjnej dla sygnałów krążeniowo-oddechowych pozwala uzyskać dodatkową wartość diagnostyczną w ocenie stanu zdrowia.

W publikacji [1] ww. wykazu prac Autor dokonał oceny jakości predykcji wartości szczytowego pochłaniania tlenu (VO_{2peak}) na podstawie sygnałów krążeniowo-oddechowych zarejestrowanych w licznej grupie sportowców (amatorów i profesjonalistów) podczas

maksymalnych prób wysiłkowych na bieżni. Badana grupa była niezbalansowana pod względem płci. Badania skupiały się na fazie submaksymalnej testu definiowanej jako czas od momentu zakończenia rozgrzewki do momentu uzyskania 85% maksymalnego tętna uzyskanego podczas testu i maksymalnego tętna z uwzględnieniem wieku. Dokładność prognozy oceniono za pomocą 10-krotnej walidacji krzyżowej, z wykorzystaniem standardowych metryk, takich jak: średni procentowy błąd bezwzględny, średni błąd bezwzględny, pierwiastek błędów, współczynnik determinacji, f^2 Cohena. Model nie był walidowany przy użyciu zewnętrznej bazy danych. Wpływ parametrów z domeny przyczynowej nie był uwzględniony w analizie. Uzyskane wyniki wykazały, że uwzględnienie parametrów oddechowych w modelu poprawia predykcję VO_{2peak} , co potwierdza część postawionej hipotezy badawczej. **Autor wykazał istotność informacji o aktywności oddechowej w predykcji VO_{2peak} .**

W pracy [2] ww. wykazu publikacji Autor zaproponował metodę analizy przyczynowości opartej na nieliniowym modelowaniu z zastosowaniem modeli uczenia maszynowego. Istotnym osiągnięciem jest opracowanie w języku Python publicznie dostępnego pakietu o nazwie *Nonlincausality*. Należy zauważyć, że praca [2] została opublikowana w 2022 roku i była cytowana 33 razy (bez autocytowań, na podstawie Scopus, stan na dzień 9.04.2025) **co świadczy o aktualności i popularności badań prowadzonych przez Doktoranta**. Na podstawie uzyskanych i opublikowanych wyników badań symulacyjnych Autor dowiódł, że opracowana metodologia korzystająca z sieci neuronowych pozwala, w przeciwieństwie do tradycyjnej podejścia zaproponowanego przez Grangera, na wykrywanie bardziej złożonych współzależności nieliniowych z jednoczesnym ominięciem ograniczeń związanych z wymogiem stacjonarności analizowanych sygnałów. Praca ma **istotne znaczenie praktyczne**, a opracowane narzędzie może znaleźć szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach, takich jak ekonomia czy medycyna. Opracowana metodologia była w dalszych pracach badawczych Autora wykorzystywana do analizy zależności przyczynowych między układami krążenia i oddechowym.

W kolejnej z prac [3] ww. wykazu Autor podjął się analizy przyczynowości między interwałami RR wyznaczonymi z sygnału EKG, a ekwiwalentem sygnału objętości oddechowej (TV) uzyskanym za pomocą pneumografii impedancyjnej w małej grupie 20 pediatrycznych pacjentów z problemami kardiologicznymi. Zastosowano metodę analizy przyczynowości opartą o sieci neuronowe (pakiet *Nonlincausality*), którą porównywano z podejściem klasycznym tj. liniową metodą Grangera i dwiema metodami nieliniowymi: jądrową przyczynowością Grangera i wieloskalową, nieliniową przyczynowością Grangera. Uzyskane przez Autora wyniki potwierdziły istotną statystycznie zależność przyczynową między RR i TV każdą z użytych metod. Zastosowanie metody opartej na sieci neuronowej, pozwoliło na wykrycie ujemnej korelacji pomiędzy BMI a wartością przyczynowości od TV do RR, co sugeruje, że miara ta może nieść informacje o aktywności autonomicznego układu nerwowego. Autor wykazał, iż **zależność przyczynowa między RR i TV jest możliwa do wykrycia u pacjentów kardiologicznych**, a różne metody wykrywania przyczynowości mogą nieść potencjalnie dodatkowe informacje diagnostyczne.

W pracy [4] ww. wykazu publikacji Autor **wykazał, że możliwa jest predykcja czasu trwania próby wysiłkowej na podstawie danych demograficznych i sygnałów krążeniowo-oddechowych** zarejestrowanych w spoczynku u młodych sportowców (piłkarzy) przed rozpoczęciem testu na cykloergometrze. Uzyskana dokładność predykcji była umiarkowanie

dobra. Do modelowania z użyciem metod uczenia maszynowego Autor wykorzystał jako wektory wejściowe oprócz danych demograficznych, nieliniowe parametry HRV, parametry oddechowe, takie jak: częstotliwość oddychania, czy względna TV, stosunek wdech/wydech, parametry z domeny przyczynowości oparte na GC oraz symboliczną entropię transferową, entropię warunkową, informację wzajemną. Badania zostały przeprowadzone na małej próbie. Mimo, iż parametry oddechowe nie wykazały kluczowego wkładu w predykcję czasu trwania próby wysiłkowej, można uznać, że **uzyskane wyniki potwierdzają postawioną przez Autora hipotezę.**

Ostatnia z prac w cyklu [5] miała na celu ocenę jakości klasyfikacji młodych osób do jednej z 3 grup: aktywne fizycznie dzieci zdrowe (młodzi sportowcy), nieaktywne fizycznie lub aktywne na poziomie rekreacyjnym dzieci zdrowe, pacjenci pediatrii z problemami kardiologicznymi. W modelu uwzględniono parametry demograficzne, parametry HRV obliczone w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz parametry nieliniowe HRV, parametry oddechowe, takie jak: częstotliwość oddychania, czy względna TV, stosunek wdech/wydech, parametry z domeny przyczynowości oparte na GC oraz parametry informacyjne oparte głównie o analizę entropii. Utworzono ostatecznie 6 zestawów danych. Wyniki wykazały, że najkorzystniejsze wartości metryk oceny jakości klasyfikacji uzyskano dla zestawu zawierającego najistotniejsze cechy określone na podstawie wartości Shapely'a (w sumie 35 cech demograficznych, krążeniowych, oddechowych oraz z domeny przyczynowej i informacyjnej). Jakość klasyfikacji była umiarkowanie dobra. **Wyniki stanowią potwierdzenie postawionej hipotezy badawczej.**

Przedłożoną do oceny rozprawę w całości **oceniam jako bardzo dobrą**. Na etapie tej lektury nasuwały się pewne pytania, uwagi i komentarze, które zostały spisane poniżej. **Uwagi szczegółowe:**

1. Tytuły rozdziałów 3-7 stanowią nieprzetłumaczone na język polski tytuły artykułów wchodzących w cykl publikacji przedłożonych do recenzji. Tytuły pozostałych rozdziałów są w języku polskim. Podobnie opisy osi i nazwy zmiennych na rysunkach są w języku angielskim. Dla staranności i poprawności opracowania wszystkie tytuły rozdziałów oraz nazwy i skróty występujące na rysunkach powinny być wyjaśnione i przetłumaczone na język polski.
2. W *Streszczeniu* Autor odwołuje się do publikacji, używając ogólnych określeń typu *kolejna praca* czy *ostatnia z publikacji*, bez podania konkretnych informacji bibliograficznych. Dla uzupełnienia wskazane byłoby dołączenie wykazu cytowanych prac również w *Streszczeniu*.
3. W pracy [1] dokonano restrykcyjnej selekcji danych, redukując liczbę zapisów z 992 do 327. Istotnym kryterium ograniczającym był wiek uczestników — do analizy włączono osoby w wieku 18–40 lat. Na jakiej podstawie przyjęto górną granicę wieku na poziomie 40 lat ?
4. W tej samej pracy [1] porównano metryki uzyskane dla 11 zestawów danych (różne kombinacje uwzględnionych parametrów) wyznaczonych dla tej samej grupy uczestników badania. Następnie użyto testu Wilcozona (wielokrotnie) do porównania dwóch zestawów danych. Na tej podstawie uznano, że zbiór D11 był statystycznie znacząco lepszy, z

- wyjątkiem zestawu D9, w porównaniu z resztą zestawów danych. Czy i jak uwzględniono zależność danych w analizie? Czy dokonano korekty na wielokrotne porównania?
5. W pracy [1] przedstawiono wykres Blanda-Altmana (rycina 8 pracy doktorskiej) dla wyników VO_{2peak} przewidzianych przez model na podstawie zestawu D11 i wartości rzeczywistych, na którym widoczna jest zależność różnicy od średniej. W pracy nie znalazłam omówienia wykresu Blanda-Altmana, ani komentarza dot. wspomnianej zależności. Czy normalność różnic została zweryfikowana?
 6. Pomimo niewątpliwej wartości naukowej i praktycznej opracowanego narzędzia opisanego w pracy [2] należałoby wskazać jaki jest bezpośredni związek uzyskanych wyników przedstawionych w tej pracy z postawioną hipotezą badawczą.
 7. W pracy [3] wykorzystano sygnały zarejestrowane u pediatrycznych pacjentów z problemami kardiologicznymi, a w pracy [4] sygnały były rejestrowane u młodych sportowców. Czy Doktorant uczestniczył w akwizycji danych, a tym samym posiada doświadczenie w przeprowadzaniu pomiarów w warunkach eksperymentalnych i klinicznych?
 8. W pracy [3] analizowano interwały RR. Dlaczego nie analizowano parametrów HRV?
 9. W kontekście postawionej hipotezy nie jest jasne jaką wartość diagnostyczną dla pediatrycznych pacjentów kardiologicznych niosą poszczególne metody wykrywania przyczynowości zastosowane i opisane w pracy [3].
 10. W pracy [4] Autor napisał, że do oceny dokładności predykcji czasu trwania próby wysiłkowej zastosował, między innymi, współczynnik korelacji Pearsona. W tej samej pracy współczynnik Pearsona (>0.2) został użyty do ograniczenia zbioru cech uwzględnionych w modelu. Na jakiej podstawie założono liniową zależność analizowanych związków oraz liniową zgodność modelu z danymi rzeczywistymi?
 11. Dlaczego w pracy [4] nie przeprowadzono analizy Blanda-Altmana i nie podano wartości współczynnika korelacji zgodności Lina dla czasów trwania próby wyznaczonych z modelu i danych rzeczywistych (analogicznie jak w pracy [1])?
 12. W pracy [5] podobnie jak w pracy [1] zastosowano test Wilcoxona w celu wyboru najlepszego zestawu danych. Czy i jak dokonano korekty na wielokrotne porównania?

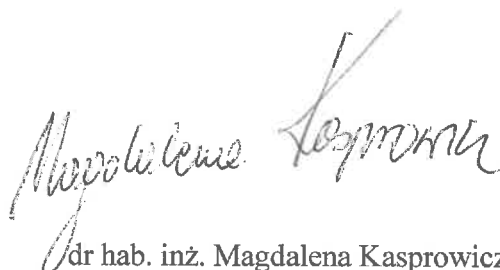
Powyższe uwagi i pytania nie obniżają mojej pozytywnej oceny rozprawy Pana Macieja Rosoła. Wyrażam przekonanie, że Doktorant wniósł istotny wkład w rozwój metod analizy zależności przyczynowych pomiędzy układem oddechowym i układem krążenia. Dodatkowym atutem pracy jest potencjał aplikacyjny uzyskanych wyników.

Wniosek końcowy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego, jakim jest zbadanie istotności aktywności oddechowej i parametrów z domeny przyczynowej i informacyjnej dla sygnałów krążeniowo-oddechowych w kontekście stanu zdrowia. Zastosowanie nieliniowych technik analizy przyczynowości do parametryzacji interakcji pomiędzy fizjologicznymi systemami regulacyjnymi jak również wykorzystanie algorytmów uczenia maszynowego do oceny przydatności diagnostycznej opracowanych narzędzi i metod analitycznych przyczyniły się do zdobycia nowej, dotąd nieopublikowanej wiedzy, a uzyskane wyniki badań są istotne dla rozwoju dyscypliny Inżynieria biomedyczna.

Tematyka rozprawy jest aktualna i ważna zarówno z naukowego, jaki praktycznego punktu widzenia. Doktorant wykazuje wysoką ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria Biomedyczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W mojej ocenie, **przedstawiona rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane przez obowiązujące ustawodawstwo**. Przy ocenie rozprawy doktorskiej Pana Rosoła, wzięłam pod uwagę: znaczenie, oryginalność podjętej tematyki, poprawność formowania hipotezy badawczej, metodykę badań, opis interpretacji uzyskanych wyników oraz strukturę rozprawy. Biorąc pod uwagę powyższe kryteria oraz uwagi zawarte w recenzji stwierdzam, że oceniona przeze mnie praca doktorska spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r.- Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668, z późn. zm.). W związku z powyższym **wnoszę o dopuszczenie Doktoranta** do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.



dr hab. inż. Magdalena Kasprowicz,
profesor Politechniki Wrocławskiej

