

Recenzja rozprawy doktorskiej zatytułowanej
Zastosowanie spersonalizowanego modelowania propagacji fali pulsu do szacowania wybranych
parametrów układu sercowo-naczyniowego
autorstwa mgra Kamila Wołosa

Recenzja została wykonana na podstawie decyzji Rady Naukowej Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej im. Macieja Nałęcz z dnia 2.12.2025 r. przekazanej mi pismem, z dnia 9.12.2026, przez z-cę Dyrektora Instytutu d.s. Naukowych Panią prof. dr hab. inż. Dorotę G. Pijanowską.

Recenzję, zgodnie z przesłaną mi sugestią, wykonałem odpowiadając na postawione pytania.

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (tezy rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Doktorant przedstawia w rozprawie możliwość wykorzystania modelu propagacji fali tętna (pulsu) oraz wybranych nieinwazyjnych pomiarów fali tętna do określenia istotnych, z klinicznego punktu widzenia, wielkości i parametrów układu krążenia. Część pomiarów służy do personalizacji modelu, a pozostała do weryfikacji uzyskanych z modelu rezultatów. Wyznaczane z modelu wielkości/parametry w klasycznym podejściu do ich określenia wymagają, bądź to pomiarów inwazyjnych lub nieinwazyjnych bądź zastosowania innych, zaawansowanych modeli. Zaprezentowane w rozprawie podejście, w przypadku sukcesu, pozwoliłoby na relatywnie proste i poszerzone monitorowanie pacjentów w wybranych rodzajach chorób. Badania przeprowadzono w grupie osób zdrowych, pacjentów hemodializowanych lub cierpiących z powodu ciężkiego, pourazowego uszkodzenia mózgu, a także na tzw. pacjentach wirtualnych (badania *in-silico*). Uzyskana z modeli informacja może, jak wskazują na to uzyskane wyniki, zostać wykorzystana do poprawy procesu terapeutycznego lub zapobiec powikłaniom wynikającym z mechanizmów wywoływanych przez procedury pomiarowe, w rozważanym przypadku z użyciem mankietów oscylometrycznych. Do powyższych badań, we wszystkich przypadkach, zastosowano badania symulacyjne przeprowadzone za pomocą modeli układu sercowo-tętniczego klasy 0-1D o różnym stopniu złożoności. Równania opisujące przepływ krwi i ciśnienie w modelowanym drzewie tętniczym zaczerpnięto z literatury. Przedstawione w literaturze równania uzyskano w wyniku całkowania, po polu przekroju poprzecznym naczynia, odpowiednich składowych równań Naviera-Stokesa. Ponadto w przedstawionych modelach przyjmuje się, że krew jest nieściśliwym płynem newtonowskim, o parabolicznym profilu prędkości, płynącym przez osiowosymetryczne sprężyste naczynia o zmiennym promieniu. Z kolei nieinwazyjne pomiary wykonywane były za pomocą metody (czujnika) tonometrii aplanacyjnej, oscylometrii mankietowej oraz kardiografii impedancyjnej. Ta ostatnia metoda została wykorzystana w zastosowaniu do oceny rzutu serca. Wyniki pomiarów za pomocą tonometrii aplanacyjnej i oscylometrii mankietowej zostały użyte do optymalizacji/personalizacji modeli systemu sercowo-tętniczego. Z kolei wybrane wielkości/parametry określone za pomocą spersonalizowanych modeli zostały wykorzystane do: 1. estymacji rzutu serca, 2. przewidywania odpowiedzi na procedurę terapeutyczną i tym samym określenia przewidywanej dawki stosowanego leku, czy 3. określenia zmian ciśnienia i przepływu krwi w wybranych, istotnych z klinicznego punktu widzenia miejscach układu krążenia (np. aorta wstępująca,

tętnice szyjne), w odpowiedzi na procedurę pomiarową, tj. przyłożenie ciśnienia do segmentów kończyn za pomocą wspomnianych mankietów.

Należy podkreślić, że modele w każdej prezentowanej w rozprawie aplikacji nie są identyczne. Różnią się zarówno warunkami brzegowymi oraz liczbą elementów. Najbardziej rozbudowany model został wykorzystany do badania odpowiedzi tętniczego układu krążenia na zamknięcie przepływu krwi w wyniku przyłożenia ciśnienia za pomocą mankietów w umieszczonych na nadgarstkach i w okolicach kostek.

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma charakter eksperymentalno-teoretyczny. Przy czym przeprowadzone eksperymenty wymagały zarówno przeprowadzenia pomiarów na wybranych grupach osób oraz zaproponowania odpowiednich modeli i przeprowadzenia symulacji numerycznych. W rezultacie takiego postępowania uzyskano informację o rzucie serca, przewidywanej dawce leku, oraz możliwych zagrożeniach wynikających ze stosowania oscylometrii mankietowej w wybranych grupach pacjentów.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle, świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów, z których pierwszy poświęcony jest ogólnemu wprowadzeniu w prezentowaną tematykę, a ostatni podsumowaniu. Zasadniczą częścią pozostałych rozdziałów, tj. 2, 3 i 4, są publikacje, których Doktorant jest współautorem, wraz z uzupełniającymi dodatkami. Układ rozdziałów 2, 3 i 4 jest identyczny i na ich zawartość składa się uszczegółowione wprowadzenie do tematyki poruszanej w publikacji, sama publikacja, oraz dodatki i informacja o wkładzie Doktoranta powstanie wspomnianych dokumentów. Tym samym odwołania do źródeł, w zależności od ich miejsca rozprawy odnoszą się do różnych list. W poniższej ocenie odniosę się do listy zbiorczej, zamieszczonej na końcu rozprawy, która powstała w wyniku odwołań w tekście rozdziału 1. (Wprowadzenie do rozprawy) i 5. (Ogólna dyskusja i wnioski). Lista jest dwuczęściowa i jej pierwsza część zawiera spis trzech, przedstawionych w rozprawie, współautorskich publikacji Doktoranta, a na drugą składa się 151 pozycji, do których odwołuje się Doktorant w tekście wspomnianych rozdziałów. Pięćdziesiąt jeden publikacji z tej listy zostało opublikowanych w latach 2020-2025, a pozostałe w latach wcześniejszych. Należy jednak zauważyć, że publikacje starsze niż pięć lat praktycznie dotyczą podstaw modelowania układu krążenia oraz medycznych, powiązanych z omawianymi w rozprawie zagadnieniami. Odnoszą się one do zjawisk i mechanizmów fizjologicznych i patologicznych. Lista zawiera też kilka publikacji przybliżających zastosowane metody pomiarowe, tj. kardiografię impedancyjną, tonometrię aplanacyjną i oscylometrię mankietową. Przedstawioną analizę źródeł uważam za pełną z małymi wyjątkami, które nie wpływają na moją pozytywną ocenę tego aspektu rozprawy. Po pierwsze, brakło mi w spisie publikacji przedstawiających podstawowe oraz teoretyczne założenia i właściwości wykorzystanych w badaniach metod pomiarowych. Po drugie, w przeglądzie literatury pominięto kilka istotnych moim zdaniem publikacji, które dotyczą analogicznych zagadnień, np. estymacji rzutu serca za pomocą innych pomiarów i modeli. Ich cytowanie pozwoliłoby na odniesienie uzyskanych rezultatów do tych otrzymywanych za pomocą tych technik lub procedur. Poniżej pozwalam sobie wymienić kilka przykładowych publikacji, które odnoszą się estymacji rzutu serca.

- B. Fetis, et al. Parametric Model Derivation of Transfer Function for Noninvasive Estimation of Aortic Pressure by Radial Tonometry, IEEE Transactions On Biomedical Engineering, Vol. 46, No. 6, June 1999,

- RBP de Wilde, et al. An evaluation of cardiac output by five arterial pulse contour techniques during cardiac surgery. *Anaesthesia*. 2007; 62(8): 760–768, doi: [10.1111/j.1365-2044.2007.05135.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.2007.05135.x), indexed in Pubmed: [17635422](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17635422/).
 - H. Xiao, et al. Estimation of cardiac stroke volume from radial pulse waveform by artificial neural network, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 218 (2022) 106738
 - P.J. Blanco, et al. One-Dimensional Blood Flow Modeling in the Cardiovascular System. From the Conventional Physiological Setting to Real-Life Hemodynamics, *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 2025; 41:e70020
3. Czy autor rozwiązał poprawnie postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Należy podkreślić, że proponowane przez Doktoranta metody badania: dokładności estymacji rzutu serca, przewidywanego dawkowania leków wazopresyjnych, czy odpowiedzi układu krążenia na procedurę pomiarową z zastosowaniem czterech mankietów zostały przeprowadzone poprawnie. W zależności od problemu został zaproponowany odpowiedni model sercowo-tętniczy, który podlegał optymalizacji pod kątem uzyskania odpowiedzi najlepiej aproksymującej rzeczywiste pomiary przeprowadzane za pomocą tonometrii aplanacyjnej bądź techniki oscylometrycznej. Optymalizacja modelu sercowo-naczyniowego została przeprowadzona zgodnie z wymaganiami i stanem wiedzy powiązanej z rozważanymi problemami. Doktorant wybrał zbiór parametrów na podstawie ich identyfikowalności i analizy czułościowej. W tego typu zagadnieniach uważa się, że jest to równoważne jednoznaczności otrzymanych wyników. Natomiast w przypadku wykorzystania otrzymanych parametrów z modelu w procedurze predykcyjnej został zaprojektowany i zaimplementowany uogólniony, liniowy, model mieszany z dwumianową funkcją łączącą. Podsumowując, nie mam zastrzeżeń do zastosowanych metod badawczych. Należy jednak podkreślić, że rozważane w rozprawie zagadnienia można rozwiązać na wiele sposobów. Metody oparte na optymalizacji modelu 0-1D systemu sercowo-tętniczego mają tę zaletę, że można zarówno modyfikować złożoność modelu sercowo-tętniczego jak i uwzględnić w nim inne elementy, np. mechanizmy regulacyjne, czy części systemu krążenia, np. krążenie płucne. Tym samym daje to możliwość rozwoju metody badawczej w przyszłości.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Wykorzystanie modeli 1D czy też 0-1D systemu sercowo-tętniczego w tzw. zagadnieniu odwrotnym, rozważanym w rozprawie, znane jest w literaturze. Pierwsze publikacje pojawiły się na przełomie XX i XXI wieku wraz z rozwojem komputerowych zasobów obliczeniowych. Doktorant w przedstawionych do oceny publikacjach wykorzystał, w znacznym stopniu, metodę badawczą zaproponowaną przez promotora rozprawy w jego wcześniejszych publikacjach, np. *Jan Poleszczuk et al. "Patient-Specific Pulse Wave Propagation Model Identifies Cardiovascular Risk Characteristics in Hemodialysis Patients. In: PLOS Computational Biology 14.9 (2018), e1006417. issn: 1553-7358*. Należy jednak podkreślić, że wykorzystane przez Doktoranta podejście różni się, od wspomnianego powyżej, swoją złożonością wynikającą zarówno z liczby elementów drzewa tętniczego jak i warunkami brzegowymi. W założeniu, czyni je bardziej dokładnym. Inna innowacja polega na rodzaju i liczbie mierzonych i wykorzystanych do optymalizacji sygnałów częściowo spersonalizowanego modelu. Dzięki temu możliwa jest estymacja, istotnych z

klinicznego punktu widzenia wielkości, np. rzutu serca czy centralnego ciśnienia tętniczego i pochodnych wielkości czy parametrów. Z formalnego punktu widzenia, według załączonych oświadczeń Doktorant był odpowiedzialny za: 1. przygotowanie koncepcji artykułów, 2. opracowanie metodologii badań, 3. walidację otrzymanych wyników, oraz 4. implementację wymaganego oprogramowania. Tak szeroki zakres zadań przełożył się na to, że Doktorant jest pierwszym autorem we wszystkich trzech załączonych publikacjach. Uważam, że to dobrze świadczy zarówno o wiedzy i kompetencjach badawczych zdobytych przez Doktoranta.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego przedstawienia uzyskanych wyników i ich interpretacji (zwięzłość, jasność)?

Rozprawa jest napisana klarownym i zrozumiałym językiem. Uzyskane wyniki są przedstawione w adekwatny i jasny sposób. Ich interpretacja nie budzi zastrzeżeń. Uważam, że Doktorant posiada umiejętność jasnego i klarownego przedstawiania problemów oraz wysnuwania wynikających z nich logicznych wniosków.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i ewentualnie jej główne wady?

Do słabej strony rozprawy zaliczam brak szerszego odniesienia się i uzasadnienia wyboru metod pomiarowych, zarówno tych które zostały wybrane do „personalizowania” modeli jak i ich weryfikacji. Zatem uwaga ta odnosi się do techniki ICG, tonometrii aplanacyjnej i oscylometrii mankietowej. Właściwie, poza nielicznymi i ogólnymi uwagami rozrzuconymi w tekście, nie można się dowiedzieć z rozprawy dlaczego te metody zostały wybrane. Czym kierował się Doktorant podejmując takie decyzje.

7. Co wniosła rozprawa do nauki i/lub techniki?

Wskazała na nowe możliwości wykorzystania modeli systemu tętniczego klasy 0-1D do monitorowania wybranych parametrów układu sercowo-tętniczego u pacjentów hemodializowanych i ciężkim pourazowym uszkodzeniu mózgu. Dalsze dopracowanie zaproponowanej metody może pozwolić na poprawę procedur terapeutycznych w wyniku uwzględnienia dodatkowych, relatywnie prostych, pomiarów. Przy czym pomiary te pozwoliłyby na szacowanie parametrów, których otrzymanie w dzisiejszych warunkach wymaga dość skomplikowanej procedury pomiarowej i nie nadaje się do wykorzystania w trybie monitorowania. Istotnym elementem rozprawy jest także informacja o możliwych konsekwencjach krążeniowych w przypadku pomiarów wielomankietowych. Aczkolwiek taki wynik był możliwy do przewidzenia na podstawie, znanej w literaturze, metody mechanicznego wspomaganie serca określanej jako techniki kontrapulsacji zewnętrznej.

8. Szczegółowe uwagi merytoryczne i redakcyjne, ew. piśmiennictwo uzupełniające.

Istotną część rozprawy, z założenia, stanowią współautorskie publikacje Doktoranta i załączniki do nich. Mimo, że zasadnicza część rozprawy (publikacje i dodatki) była już recenzowana, jak się można domyślać przez co najmniej przez 6 recenzentów, to w ich tekście znajduje się wiele błędów. Zakładam, że w prawie wszystkich przypadkach są to błędy edycyjne. Zaliczam do ich niepoprawną postać wzorów (2) i (14) w publikacji A1, pominięcie jednego dopasowania fali tętna w Supplementary material 2 do publikacji A1. Dwukrotne wykazanie tej samej publikacji z różnym opisem bibliograficznym. Raz w Supplementary materials for the article "Non-invasive..." pozycja 6. i następnie pozycja 11. w Supplementary Material 1

do publikacji A3. Pominięcie wykładnika w równaniu (3) oraz niepoprawne przypisanie lepkości i gęstości krwi w Table 2 w tym samym dodatku.


Podczas prezentacji proszę o odniesienie się do następujących problemów:

- Doktorant używa pojęcia spersonalizowany model do zaproponowanych modeli. Kiedy taka klasyfikacja jest według Doktoranta uzasadniona?
- Jaka jest różnica w elastancji lewej komory serca opisana zależnościami (7) i (8) w publikacji A1 i zależnościami (10) i (11) w Supplementary Material 1 do publikacji A3 i jak to wpływa na kształt modelowanej fali ciśnienia?
- Czym podyktowana zmiana równania stanu zapisana zależnością (1) w publikacji A1 na zależność (4) w dodatku S1 do publikacji A2 i jak to wpływa wyniki symulacji?
- Proszę o wskazanie mocnych i słabych stron zastosowania techniki elektroimpedancyjnej do określania rzutu serca u pacjentów hemodializowanych.

9. Jak Recenzent ocenia rozprawę (podać uzasadnienie):

Rozprawę zaliczam do kategorii spełniającej wymagania z wyraźnym nadmiarem. Wyniki badań zostały opublikowane w czasopiśmie o międzynarodowym zasięgu. Zaproponowane podejście, przynajmniej w przypadku estymacji rzutu skurczowego lewej komory, ma potencjalnie możliwości prowadzenia dalszych badań i, co ważniejsze, zwiększenia możliwości interpretacji otrzymywanych wyników.

Do silnych stron rozprawy zaliczam także fakt, że wyniki z badań modelowych zostały zweryfikowane za pomocą pomiarów przeprowadzonych na relatywnie licznych grupach osób (zarówno pacjentów i zdrowych). Wymagało to znacznego, dodatkowego nakładu pracy i kontaktów z lekarzami. Moim zdaniem takie uwarunkowania realizacji rozpraw z zakresu inżynierii biomedycznej, w odróżnieniu od tych realizowanych w obszarze czysto „technicznych” dyscyplin, istotnie podnoszą ich wartość jak i istotnie wpływają na poszerzenie kompetencji doktorantów.



Prof. dr hab. inż. Jerzy Wtorek