

Poznań, dnia 07.08.2025

dr hab. inż. Tomasz Garbowski, prof. UPP
Katedra Inżynierii Biosystemów
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

pt. „Optymalizacja właściwości mechanicznych protezy stopy”

autorstwa mgr. inż. Agaty Mrozek-Czajkowskiej

1. PODSTAWA FORMALNA OPRACOWANIA RECENZJI

Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 28 kwietnia 2025r. nr 19/iii/04/2025 oraz pismo Pana Dziekana dra hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP - Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna tejże Uczelni, a także umowa o dzieło numer 0600/2025/99.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY I KANDYDATA

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Agaty Mrozek-Czajkowskiej, pt. „Optymalizacja właściwości mechanicznych protezy stopy”, wykonana pod kierunkiem dr hab. Tomasza Stręka, prof. PP (promotor) oraz dr inż. Jakuba K. Grabskiego (promotor pomocniczy), została zrealizowana w Zakładzie Mechaniki Technicznej, Instytutu Mechaniki Stosowanej Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej.

Dysertacja ma charakter teoretyczno–obliczeniowy z elementami walidacji eksperymentalnej i dotyczy zastosowania zaawansowanych metod optymalizacyjnych (m.in. algorytmu genetycznego oraz algorytmu zainspirowanego zachowaniem wirusów) w procesie projektowania protez stóp, w tym konstrukcji bazujących na metamateriałach auksetycznych. Autorka koncentruje się na modelowaniu biomechaniki chodu z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES), uwzględniając zarówno parametry materiałowe, jak i geometryczne konstrukcji protezy, w celu możliwie wiernego odwzorowania charakterystyk pionowej siły reakcji podłoża uzyskiwanych dla fizjologicznej kończyny.

Rozprawa liczy 114 stron maszynopisu i obejmuje dziewięć rozdziałów. Pierwsze cztery stanowią wprowadzenie teoretyczne, przegląd literatury oraz omówienie podstawowych pojęć z zakresu anatomii i biomechaniki stopy, modelowania MES oraz charakterystyki metamateriałów auksetycznych. Kolejne trzy rozdziały prezentują autorskie rozwiązania i wyniki badań: proces tworzenia modelu MES chodu, optymalizację geometryczną protez stóp oraz optymalizację topologiczną z wykorzystaniem materiałów auksetycznych. Rozdział dziewiąty zawiera podsumowanie i wnioski. Układ pracy jest przejrzysty i logiczny, co ułatwia śledzenie toku wywodu i powiązań pomiędzy poszczególnymi etapami badań.

Praca napisana jest poprawnym, klarownym językiem technicznym, z zachowaniem standardów redakcyjnych obowiązujących w pracach naukowych. Ilustracje, tabele oraz schematy są czytelne i adekwatne do omawianych treści, a obszerna bibliografia (ponad 80 pozycji) obejmuje zarówno źródła klasyczne, jak i najnowsze publikacje z zakresu biomechaniki, modelowania MES i optymalizacji konstrukcji.

Mgr inż. Agata Mrozek-Czajkowska wykazała się dużą samodzielnością badawczą, znajomością nowoczesnych metod obliczeniowych oraz umiejętnością ich twórczego zastosowania w zagadnieniu o wysokim znaczeniu praktycznym. Jej prace wpisują się w aktualny nurt badań nad personalizacją i poprawą funkcjonalności protez kończyn dolnych, łącząc wiedzę z zakresu mechaniki, inżynierii biomedycznej oraz materiałoznawstwa.

3. OCENA PRACY

Rozprawa mgr inż. Agaty Mrozek-Czajkowskiej stanowi wartościowe i spójne opracowanie problematyki optymalizacji właściwości mechanicznych protez stóp z wykorzystaniem metod numerycznych i algorytmów optymalizacyjnych. Autorka z powodzeniem połączyła wiedzę z zakresu biomechaniki chodu, modelowania MES oraz nowoczesnych technik optymalizacji konstrukcji, uzyskując wyniki o istotnym potencjale aplikacyjnym w inżynierii biomedycznej.

Na szczególne podkreślenie zasługuje kompleksowe podejście do problemu — od analizy anatomiczno-biomechanicznej, poprzez stworzenie szczegółowego modelu MES chodu pacjenta, aż po zastosowanie autorskich procedur optymalizacyjnych, w tym rzadko spotykanego w inżynierii biomedycznej algorytmu zainspirowanego zachowaniem wirusów (VOA). Połączenie optymalizacji parametrów materiałowych, geometrii oraz topologii, przy jednoczesnym uwzględnieniu możliwości zastosowania metamateriałów auksetycznych, świadczy o dużej innowacyjności pracy.

Opracowany model MES został poprawnie zdefiniowany zarówno w warstwie geometrycznej, jak i materiałowej, a warunki brzegowe oraz scenariusze obciążeniowe odpowiadają założeniom biomechaniki chodu. Wysoko ocenić należy próbę walidacji numerycznej odpowiedzi modelu na podstawie danych eksperymentalnych (przebieg pionowej siły reakcji podłoża), co podnosi wiarygodność uzyskanych wyników. Prezentacja wyników w formie wykresów, map naprężeń i porównań charakterystyk jest czytelna, a interpretacja wyników rzetelna i dobrze umotywowana.

Praca wnosi nowy wkład do badań nad protezami stóp, wskazując konkretne rozwiązania konstrukcyjne oraz zestawy parametrów pozwalające poprawić odwzorowanie fizjologicznych charakterystyk chodu. Uwzględnienie w badaniach metamateriałów auksetycznych należy uznać za szczególnie cenne, gdyż materiały te są wciąż rzadko analizowane w kontekście protetyki ortopedycznej, a ich właściwości mogą w przyszłości istotnie podnieść funkcjonalność zaopatrzenia protetycznego.

Przy wysokiej ocenie całości należy jednak wspomnieć o kilku obszarach, które mogłyby zostać rozwinięte lub doprecyzowane:

- Walidacja eksperymentalna ogranicza się głównie do porównania przebiegów sił reakcji podłoża – warto byłoby rozważyć uzupełnienie jej o dodatkowe parametry kinematyczne lub dynamiczne chodu, np. trajektorie stawów czy rozkład ciśnień pod stopą.
- Opis procedury optymalizacji, choć poprawny, mógłby zostać wzbogacony o porównanie skuteczności poszczególnych algorytmów (GA, VOA) w kontekście zbieżności i jakości rozwiązania.



- W przypadku rozdziału dotyczącego metamateriałów auksetycznych warto byłoby wskazać, jakie ograniczenia technologiczne mogą wynikać z ich wytwarzania i jak wpływa to na możliwość ich implementacji w protezach stóp.

Podsumowując, praca jest oryginalna, starannie przygotowana, poprawna pod względem merytorycznym i metodycznym oraz stanowi wartościowy wkład w rozwój narzędzi i metod projektowania nowoczesnych protez stóp. Wyniki badań mogą znaleźć praktyczne zastosowanie zarówno w projektowaniu komercyjnych protez, jak i w dalszych pracach badawczo-rozwojowych nad personalizowanym zaopatrzeniem ortopedycznym.

4. UWAGI SZCZEGÓŁOWE I DYSKUSYJNE

4.1. Strona merytoryczna

Rozprawa wyróżnia się bardzo szerokim i przemyślanym podejściem do zagadnienia optymalizacji protez stóp. Autorka rozpoczęła od gruntownego przeglądu literatury obejmującego anatomię i biomechanikę stopy, zagadnienia modelowania MES oraz charakterystykę metamateriałów auksetycznych, a następnie przeszła do opracowania własnych procedur optymalizacyjnych. Taka struktura pracy pokazuje, że badania nie zostały prowadzone w sposób przypadkowy, lecz osadzone są w kontekście teoretycznym i poparte wiedzą o najnowszych trendach badawczych. Istotne jest również to, że autorka nie ograniczyła się do jednego wątku badawczego – w pracy połączono kilka metod optymalizacji, różne warianty modelowania numerycznego oraz rozważono potencjalne innowacje materiałowe. To sprawia, że praca stanowi przykład spójnego i interdyscyplinarnego podejścia, które jest szczególnie cenione we współczesnych badaniach inżynierskich.

Na uwagę zasługuje dobór metod optymalizacji – autorka zastosowała zarówno klasyczny algorytm genetyczny (GA), znany z dużej elastyczności w rozwiązywaniu złożonych problemów inżynierskich, jak i mniej popularny w inżynierii biomedycznej algorytm zainspirowany zachowaniem wirusów (VOA). Wykorzystanie tego drugiego świadczy o poszukiwaniu innowacyjnych narzędzi i gotowości do eksperymentowania z metodami, które w danej dziedzinie są dopiero w fazie adaptacji. Oba algorytmy zostały zaimplementowane w sposób pozwalający na optymalizację parametrów zarówno materiałowych, jak i geometrycznych. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie wieloaspektowych analiz, w których rozwiązanie nie jest narzucone z góry, lecz wyłania się w wyniku ewolucji populacji rozwiązań. Ta część pracy dowodzi, że autorka swobodnie porusza się w zakresie algorytmiki i potrafi dostosować metody znane z informatyki czy inżynierii mechanicznej do realnych problemów biomedycznych.

Jednym z najważniejszych elementów każdego modelu numerycznego jest jego weryfikacja względem danych rzeczywistych. Autorka przeprowadziła walidację poprzez porównanie charakterystyk pionowej siły reakcji podłoża uzyskanych w modelu MES z danymi pomiarowymi. Takie porównanie jest nie tylko formalnym potwierdzeniem poprawności modelu, ale również istotnym krokiem w kierunku praktycznej użyteczności wyników. Fakt, że model odwzorowuje przebieg siły w sposób zbliżony do wartości eksperymentalnych, świadczy o odpowiednim doborze parametrów materiałowych, warunków brzegowych i obciążeń. W pracy widać dbałość o to, by proces walidacji był integralną częścią badań, a nie tylko dodatkiem. Zastosowana metodologia może być wykorzystana w dalszych badaniach nad personalizacją protez, a sama walidacja stanowi solidny fundament pod potencjalne prace wdrożeniowe.

Wprowadzenie do analiz konstrukcyjnych metamateriałów auksetycznych jest rozwiązaniem nowatorskim w kontekście protez stóp. Materiały te, dzięki ujemnemu współczynnikowi Poissona, mają unikalne właściwości mechaniczne – zwiększają swój przekrój poprzeczny podczas rozciągania,

co pozwala projektować konstrukcje lepiej amortyzujące obciążenia lub bardziej odporne na uszkodzenia zmęczeniowe. Autorka nie ograniczyła się do teoretycznego opisu, ale przeprowadziła optymalizację topologiczną z uwzględnieniem takich materiałów, porównując ich efektywność z materiałami konwencjonalnymi. Ten element pracy wyróżnia ją na tle typowych badań nad protezami, w których analizuje się głównie klasyczne kompozyty czy stopy metali. Włączenie metamateriałów auksetycznych do badań może w przyszłości doprowadzić do powstania bardziej funkcjonalnych, lżejszych i wytrzymalszych protez.

4.2. Strona redakcyjna

Rozprawa jest napisana w sposób przejrzysty, z zachowaniem logicznego układu treści i poprawności językowej. Poszczególne rozdziały są spójne i płynnie przechodzą od wprowadzenia teoretycznego do części badawczej. W pracy zastosowano czytelne rysunki i diagramy, które ułatwiają zrozumienie omawianych zagadnień. Wykresy przedstawiające wyniki optymalizacji oraz przebiegi sił reakcji podłoża są dobrze opisane, z uwzględnieniem jednostek, legend i czytelnych oznaczeń. Bibliografia jest obszerna i aktualna – obejmuje ponad 80 pozycji, w tym publikacje z ostatnich lat, co dowodzi, że autorka śledziła bieżący stan badań w obszarze mechaniki, biomechaniki oraz materiałoznawstwa. Wysoka jakość redakcyjna przekłada się na komfort odbioru treści i podkreśla profesjonalny charakter dysertacji.

4.3. Szczegółowe uwagi krytyczne

Choć autorka przeprowadziła istotny etap weryfikacji modelu poprzez porównanie pionowej składowej siły reakcji podłoża, zakres walidacji można uznać za wąski. W biomechanice chodu wartościowa jest również analiza kinematyczna, obejmująca np. trajektorie ruchu stawów, kąty zgięcia w stawach czy czas trwania poszczególnych faz cyklu chodu. Dodatkowo można rozważyć pomiary rozkładu ciśnień pod stopą, co pozwoliłoby lepiej ocenić odwzorowanie przez model kontaktu protezy z podłożem. Rozszerzenie walidacji o te elementy mogłoby istotnie wzmocnić argumentację, że model w pełni odwzorowuje rzeczywiste warunki użytkowania protezy.

W pracy zastosowano dwa różne algorytmy optymalizacyjne – GA i VOA – ale zabrakło szczegółowego zestawienia ich efektywności. Takie porównanie mogłoby obejmować m.in. liczbę iteracji potrzebnych do uzyskania zbieżności, stabilność wyników przy różnych warunkach początkowych, odporność na minima lokalne czy wrażliwość na zmianę parametrów sterujących. Nawet jeśli celem pracy nie było tworzenie rankingu algorytmów, to wskazanie ich mocnych i słabych stron w kontekście projektowania protez stóp byłoby cenne dla innych badaczy i praktyków, którzy mogliby w przyszłości wybierać metodę optymalizacji najlepiej dopasowaną do danego problemu.

Praca pokazuje, że metamateriały auksetyczne mogą poprawić właściwości mechaniczne protezy, ale brakuje szczegółowej dyskusji o ograniczeniach technologicznych. W praktyce, implementacja takich materiałów wymaga znajomości procesów ich wytwarzania (np. druku 3D z polimerów czy kompozytów), tolerancji produkcyjnych czy kosztów jednostkowych. Brak odniesienia do tych aspektów powoduje, że wyniki mają charakter głównie koncepcyjny, a przejście do etapu wdrożenia wymagałoby dodatkowych analiz. W przyszłości warto byłoby uzupełnić badania o ocenę wykonalności technologicznej oraz analizę ekonomiczną.

Optymalizacja protezy wymaga znajomości tego, które parametry mają największy wpływ na wynik końcowy – czy jest to grubość elementów, kształt łuku, rodzaj materiału, czy może kombinacja kilku czynników. W pracy zabrakło wyraźnego modułu analizy wrażliwości, który pozwoliłby wskazać priorytetowe obszary modyfikacji konstrukcji. Takie badanie nie tylko zwiększa efektywność samego



procesu optymalizacji, ale również ułatwia późniejsze wdrożenie wyników do praktyki inżynierskiej, gdzie zwykle dąży się do minimalizacji kosztów i czasu projektowania.

Dysertacja ma charakter głównie obliczeniowo–projektowy, co jest w pełni uzasadnione w kontekście celu pracy, jednak jej wartość praktyczna mogłaby wzrosnąć, gdyby znalazły się w niej wyniki testów laboratoryjnych na prototypach. Nawet wstępne badania mechaniczne wybranych wariantów protezy, wykonane np. metodą prób zginania czy zmęczeniowych, pozwoliłyby lepiej ocenić, na ile model numeryczny odzwierciedla realne zachowanie konstrukcji. W przyszłości takie eksperymenty mogłyby również posłużyć do dalszej kalibracji i ulepszania modelu MES.

Wymienione wyżej uwagi krytyczne i dyskusyjne nie mają wielkiego znaczenia dla ogólnie pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy, ale wymagają uwagi autorki i ewentualnego odniesienia się do powyższych spostrzeżeń.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Rozprawa doktorska mgr inż. Agaty Mrozek-Czajkowskiej pt. *„Optymalizacja właściwości mechanicznych protezy stopy”* jest pracą oryginalną, wartościową merytorycznie i metodologicznie, a także wpisującą się w aktualny nurt badań z zakresu inżynierii biomedycznej, mechaniki stosowanej oraz projektowania konstrukcji z wykorzystaniem metod optymalizacyjnych. Autorka wykazała się szeroką wiedzą z zakresu biomechaniki, materiałoznawstwa, modelowania numerycznego oraz algorytmiki, a także umiejętnością łączenia tych obszarów w spójny proces badawczy.

Zastosowanie w badaniach zarówno algorytmu genetycznego, jak i algorytmu zainspirowanego zachowaniem wirusów, a także uwzględnienie potencjału metamateriałów auksetycznych, nadaje pracy wymiar innowacyjny i zwiększa jej potencjał aplikacyjny. Prezentacja wyników jest przejrzysta, a wnioski jasno sformułowane i poparte analizą uzyskanych rezultatów.

Uwagi krytyczne dotyczące ograniczonego zakresu walidacji eksperymentalnej, braku porównania efektywności algorytmów czy niewystarczającego rozwinięcia aspektów technologicznych metamateriałów auksetycznych nie obniżają w istotny sposób wartości naukowej rozprawy. Można je traktować jako naturalne kierunki dalszych prac badawczych.

Podsumowując, oceniam rozprawę bardzo pozytywnie i stwierdzam, że spełnia ona wymagania określone w art. 187 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.) oraz w Statucie Politechniki Poznańskiej, w zakresie nadania stopnia naukowego doktora.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Agaty Mrozek-Czajkowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego i rekomenduję o dopuszczenie jej do obrony publicznej.

