

Dr hab. inż. Dariusz M. Perkowski, prof. PB
Politechnika Białostocka
Wydział Mechaniczny
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej
Ul. Wiejska 45C, Białystok 15-351
Email: d.perkowski@pb.edu.pl, tel. +48 571 443 034

Białystok, 4 września 2025 r.



Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Agaty Mrozek-Czajkowskiej

„Optymalizacja właściwości mechanicznych protezy stopy”

wykonana pod opieką naukową:

Pana Promotora Dr. hab. Tomasza Stręka, prof. Politechniki Poznańskiej oraz Promotora

Pomocniczego: dr inż. Jakuba K. Grabskiego

1. Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP.

2. Opis zawartości pracy:

Praca doktorska mgr inż. Agaty Mrozek-Czajkowskiej pt. „Optymalizacja właściwości mechanicznych protezy stopy” poświęcona została zagadnieniu niezwykle aktualnemu i istotnemu w obszarze biomechaniki, inżynierii mechanicznej oraz protetyki – mianowicie projektowaniu, analizie i optymalizacji konstrukcji protez stóp z uwzględnieniem zarówno aspektów biomechanicznych chodu, jak i zastosowania innowacyjnych materiałów oraz algorytmów optymalizacyjnych. Autorka podjęła próbę rozwiązania problemu kluczowego dla osób po amputacji kończyny dolnej: w jaki sposób zindywidualizować konstrukcję protezy tak, aby możliwie najlepiej odwzorowywała naturalny chód, minimalizowała asymetrię, poprawiała komfort użytkowania i ograniczała degradację stawów, a jednocześnie pozostawała funkcjonalna w codziennym użytkowaniu. W centrum badań znalazło się nie tylko odwzorowanie biomechaniki chodu człowieka w modelach numerycznych, ale przede wszystkim zastosowanie zaawansowanych metod optymalizacji geometrycznej, topologicznej i materiałowej, w tym wykorzystanie metamateriałów auksetycznych, które ze względu na swoją nietypową odpowiedź mechaniczną stanowią perspektywiczny kierunek rozwoju w konstrukcji protez.

Zawartość rozprawy została ułożona w sposób przejrzysty i logiczny. W początkowych rozdziałach doktorantka przedstawia szerokie tło teoretyczne, obejmujące anatomie i

biomechanikę stopy, a także analizę cyklu chodu. Omówiono tu funkcje podstawowych struktur anatomicznych – kości stępu, śródstopia, palców – oraz łuków podłużnych i poprzecznych, które w istotny sposób determinują zdolności podporowe i lokomocyjne stopy. Autorka pokazuje, jak poszczególne fazy cyklu chodu, zdefiniowane przez kolejne kontakty pięty z podłożem, generują charakterystyczne przebiegi sił reakcji podłoża, a także jak asymetrie związane z amputacją i użytkowaniem protez przekładają się na zwiększone obciążenia zdrowej kończyny. Jest to nie tylko teoretyczne wprowadzenie, ale fundament dalszych analiz numerycznych, w których kryterium porównawczym staje się pionowa składowa siły reakcji podłoża.

Następnie autorka przechodzi do problematyki modelowania biomechaniki chodu z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Dokładnie omówione zostały różne podejścia do pozyskiwania geometrii stopy – od modeli uproszczonych, opartych na podstawowych kształtach geometrycznych, po rekonstrukcję anatomicznie wierną na podstawie obrazowania MRI i CT. Podkreślono kompromis pomiędzy szczegółowością modelu a czasem obliczeń i możliwościami numerycznymi. Przeanalizowano także stosowane w literaturze modele materiałowe: dla kości przyjmowane zazwyczaj jako izotropowe, liniowo-sprężyste lub sprężysto-plastyczne; dla tkanek miękkich – opisywane hipersprężystymi modelami Ogdena, Mooney’a-Rivlina czy Neo-Hookeana. Autorka wskazuje, że poprawne odwzorowanie tych właściwości jest kluczowe dla uzyskania wiarygodnej symulacji, szczególnie w kontekście dynamiki chodu i interakcji z podłożem. Kolejny aspekt to warunki brzegowe i obciążenia. Tu praca prezentuje różne strategie: przyłożenie sił reakcji podłoża i momentów w stawie skokowym na podstawie danych eksperymentalnych z platform dynamometrycznych i systemów analizy ruchu, aż po zintegrowane modele mięśniowo-szkieletowe sprzężone z FEM. Ten przegląd umożliwia świadome zaprojektowanie własnego modelu obliczeniowego, który posłużył następnie do procesu optymalizacji.

Rozdziały kolejnej części pracy dotyczą bezpośrednio zagadnień protetyki. Doktorantka prezentuje klasyfikację protez stóp – od prostych konstrukcji SACH, przez protezy magazynujące i oddające energię (ESR), aż po zaawansowane protezy bioniczne wyposażone w aktywne elementy sterowane siłownikami. Wskazuje na kompromisy pomiędzy sztywnością, a elastycznością konstrukcji protezy – pierwsza zapewnia stabilność, druga umożliwia zwrot energii i efektywniejsze odbicie w fazie propulsji. Ta część pracy jest ważnym łącznikiem pomiędzy biomechaniką a inżynierią konstrukcji, bowiem pozwala zdefiniować wymagania i kierunki dalszej optymalizacji.

Szczególne miejsce w rozprawie zajmuje rozdział poświęcony metamateriałom auksetycznym. Zostały one scharakteryzowane jako materiały o ujemnym współczynniku Poissona, które zwiększają swoje wymiary poprzeczne przy rozciąganiu. Autorka wskazuje potencjalne korzyści ich zastosowania w konstrukcjach protez – większą absorpcję energii, poprawę komfortu użytkowania, a także możliwość projektowania geometrii o nietypowych właściwościach mechanicznych. Zastosowanie metamateriałów w protetyce stóp zostało następnie poddane weryfikacji poprzez optymalizację topologiczną w środowisku numerycznym.

Kolejne rozdziały pracy opisują już własne badania doktorantki. Proces tworzenia modelu FEM chodu oparty został na danych anatomicznych i biomechanicznych pacjenta, uzyskanych odpowiednio z obrazowania medycznego i systemów analizy ruchu. Dokładnie opisano etapy: generowanie geometrii, definiowanie warunków brzegowych, przypisanie właściwości materiałowych. Następnie zastosowano dwa algorytmy optymalizacyjne – klasyczny algorytm genetyczny oraz mniej typowy, inspirowany zachowaniem wirusów, Virus Optimization Algorithm. Pierwszy został użyty do kalibracji parametrów materiałowych w modelach hipersprężystych, tak aby uzyskane odpowiedzi numeryczne były zgodne z wynikami eksperymentalnymi (np. testy wgłębnika). Drugi posłużył zarówno do optymalizacji parametrów modelu materiałowego, jak i później do optymalizacji geometrycznej protezy, w której celem było odwzorowanie przebiegu pionowej siły reakcji podłoża w możliwie największym stopniu zgodnym z rejestracją eksperymentalną.

Autorka opracowała także własny algorytm generowania geometrii protezy stopy, który parametryzuje jej kształt na podstawie wybranych zmiennych konstrukcyjnych. Taki model parametryczny umożliwił następnie systematyczną analizę DoE (Design of Experiments), w której wskazano czynniki najbardziej wpływające na odpowiedź biomechaniczną. Wyniki tej analizy zostały następnie użyte jako baza do optymalizacji prowadzonej za pomocą VOA. Efektem były konstrukcje protez lepiej dopasowane do indywidualnych potrzeb pacjenta, zdolne odwzorować naturalny przebieg reakcji podłoża, a tym samym zmniejszyć asymetrię chodu.

Ostatni blok badań dotyczył optymalizacji topologicznej protez z wykorzystaniem materiałów auksetycznych. Autorka przeprowadziła symulacje dla różnych przypadków obciążeń i kilku wariantów materiałowych, porównując rozwiązania konwencjonalne z auksetycznymi. Wykazano, że zastosowanie metamateriałów pozwala uzyskać bardziej korzystne rozkłady naprężeń i lepszą odpowiedź w krytycznych fazach cyklu chodu. Symulacje potwierdziły potencjał tej klasy materiałów do praktycznego wykorzystania w protetyce.

Całość pracy zamyka rozdział z wnioskami, w którym autorka jednoznacznie wskazuje, że zastosowanie algorytmów optymalizacyjnych w połączeniu z nowoczesnymi materiałami pozwala istotnie poprawić funkcjonalność i komfort użytkowania protez stóp. Wnioski podkreślają też interdyscyplinarny charakter badań – łączący mechanikę stosowaną, biomechanikę, inżynierię materiałową i informatykę, a także ich potencjał aplikacyjny w praktyce klinicznej.

Podsumowując, rozprawa przedstawia kompleksowe i wieloaspektowe ujęcie problemu optymalizacji protez stóp. Doktorantka wykazała się znajomością stanu wiedzy, umiejętnością krytycznej analizy literatury, a przede wszystkim zdolnością do samodzielnego prowadzenia badań obejmujących zarówno przygotowanie i walidację modeli numerycznych, jak i opracowanie oraz implementację zaawansowanych algorytmów optymalizacyjnych. Zastosowanie metamateriałów auksetycznych w optymalizacji topologicznej protez stóp stanowi dodatkowo element oryginalny i innowacyjny, wykraczający poza standardowe podejścia w tej dziedzinie.

3. Oryginalność pracy

Oryginalność rozprawy mgr inż. Agaty Mrozek-Czajkowskiej polega przede wszystkim na wprowadzeniu do badań nad protezami stóp metod i narzędzi, które dotąd praktycznie nie były stosowane w tej dziedzinie. Autorka, obok klasycznego algorytmu genetycznego, zastosowała algorytm optymalizacyjny inspirowany zachowaniem wirusów (VOA), co stanowi rozwiązanie unikalne i nowatorskie. Porównanie obu metod pozwoliło wskazać ich skuteczność w dopasowywaniu parametrów materiałowych i geometrycznych protezy do danych eksperymentalnych, a uzyskane wyniki pokazują potencjał wykorzystania VOA w biomechanice.

Kolejnym istotnym osiągnięciem jest opracowanie parametrycznego modelu protezy, który umożliwia automatyczne generowanie geometrii i bezpośrednie jej sprzężenie z procesem optymalizacji. Dzięki temu konstrukcja protezy nie jest analizowana w kilku sztywnych wariantach, ale kształtowana dynamicznie w oparciu o kryterium biomechaniczne – przebieg pionowej składowej siły reakcji podłoża. To podejście wyróżnia pracę i wskazuje na wysoki poziom innowacyjności.

Na szczególne podkreślenie zasługuje także wprowadzenie do analiz metamateriałów auksetycznych. Autorka wykorzystała je w procesie optymalizacji topologicznej protez, porównując ich odpowiedź z materiałami konwencjonalnymi. Wyniki pokazały, że materiały o ujemnym współczynniku Poissona mogą korzystnie wpływać na funkcjonalność i komfort użytkowania protezy, a także otwierają nowe możliwości w projektowaniu konstrukcji

ortopedycznych. Ten element badań ma charakter pionierski i stanowi oryginalny wkład w rozwój wiedzy w dziedzinie inżynierii biomedycznej.

Podsumowując, oryginalność pracy polega na połączeniu trzech obszarów: zastosowania rzadko używanych algorytmów optymalizacyjnych, opracowania parametrycznego modelu protezy oraz wprowadzenia metamateriałów auksetycznych do projektowania protez stóp. Tak szerokie i interdyscyplinarne podejście sprawia, że rozprawa wnosi nową jakość i stanowi istotny krok w kierunku praktycznego wykorzystania nowoczesnych metod w protetyce.

4. Wartości użytkowe pracy

Wartość praktyczna rozprawy mgr inż. Agaty Mrozek-Czajkowskiej jest niewątpliwie wysoka i wyraźnie widoczna w wynikach badań. Przede wszystkim autorka opracowała proces projektowania protezy stopy, który nie kończy się jedynie na analizie numerycznej, ale obejmuje pełny cykl: od stworzenia parametrycznego modelu, poprzez optymalizację materiałową i geometryczną, aż po ocenę biomechaniczną na podstawie porównania z danymi eksperymentalnymi. Takie podejście umożliwia praktyczne wykorzystanie wyników w pracy protetyków i inżynierów zajmujących się konstrukcją protez.

Istotnym osiągnięciem jest możliwość dopasowania protezy do indywidualnych potrzeb pacjenta. Dzięki wykorzystaniu algorytmów optymalizacyjnych, konstrukcja protezy może zostać dostosowana do masy ciała, wzorca chodu czy poziomu aktywności użytkownika. W praktyce oznacza to możliwość tworzenia protez bardziej komfortowych i funkcjonalnych, które lepiej odwzorowują naturalny chód i ograniczają asymetrię obciążeń. To bezpośrednio przekłada się na zmniejszenie ryzyka degradacji stawów zdrowej kończyny, co jest jednym z kluczowych problemów w rehabilitacji osób po amputacji.

Na wartość praktyczną rozprawy wpływa również wprowadzenie metamateriałów auksetycznych do konstrukcji protez. Wykazane w pracy korzyści z ich zastosowania - lepsze rozłożenie naprężeń, większa zdolność absorpcji energii i poprawa odpowiedzi mechanicznej w krytycznych fazach chodu – mogą stać się podstawą do opracowania nowych generacji protez. Jest to rozwiązanie, które ma szansę znaleźć realne zastosowanie przemysłowe i kliniczne, szczególnie w kontekście personalizowanej protetyki.

Ważnym aspektem praktycznym jest także opracowany algorytm automatycznego generowania geometrii protezy. Takie narzędzie może być wykorzystane w procesie szybkiego projektowania, skracając czas potrzebny na przygotowanie modeli i umożliwiając ich dalszą analizę oraz wytwarzanie np. w technologiach addytywnych. Włączenie metod DoE i optymalizacji topologicznej sprawia, że cały proces jest nie tylko automatyczny, ale również ukierunkowany na uzyskanie najlepszego możliwego rozwiązania pod kątem biomechaniki.

Podsumowując, praca ma bardzo dużą wartość aplikacyjną. Wyniki mogą znaleźć zastosowanie w praktyce inżynierskiej i klinicznej – zarówno w procesie projektowania protez, jak i w ich dalszym rozwoju technologicznym. Opracowane metody i wnioski mogą być wykorzystane w przyszłości do tworzenia spersonalizowanych, nowoczesnych protez stóp, które podniosą komfort i jakość życia pacjentów.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa jest pracą oryginalną, wartościową i dobrze udokumentowaną. Tekst został napisany w sposób spójny i przejrzysty, a kolejne rozdziały logicznie prowadzą od opisu biomechaniki stopy, poprzez modelowanie numeryczne chodu, aż do optymalizacji protez z wykorzystaniem materiałów auksetycznych. Rozprawa jest bogato zilustrowana schematami, wykresami i rysunkami, które ułatwiają śledzenie procesu badawczego i weryfikację uzyskanych wyników. Ogólna ocena pracy jest wysoka – rozprawa podejmuje ważne i aktualne zagadnienia z obszaru protetyki i inżynierii biomedycznej, a zaprezentowane rezultaty mają zarówno wartość naukową, jak i praktyczną. Opracowane modele numeryczne oparte na metodzie elementów skończonych, wsparte danymi eksperymentalnymi, wskazują, że zaproponowane podejście badawcze jest trafne, a postawiona teza o możliwości dopasowania odpowiedzi protezy do fizjologicznego przebiegu sił reakcji podłoża została potwierdzona. Wyniki dotyczące zastosowania metamateriałów auksetycznych pokazują ich potencjał w konstrukcji nowoczesnych protez stóp.

Mimo wysokiej oceny, kilka kwestii wymaga jednak doprecyzowania i szerszej dyskusji z Autorką:

1. W pracy zastosowano algorytm wirusowy (VOA) do optymalizacji materiałowej i geometrycznej protezy. Warto byłoby szczegółowiej uzasadnić wybór tego właśnie algorytmu, wskazując jego przewagi nad innymi metodami metaheurystycznymi.
2. Modele materiałowe zastosowane dla tkanek miękkich oparto głównie na modelu Ogdena i Mooney-Rivlina. Brakuje jednak pogłębionej dyskusji, w jakim stopniu uproszczenia przyjęte w symulacjach (np. traktowanie kości jako materiałów liniowo-sprężystych) wpływają na wiarygodność wyników chodu w warunkach dynamicznych.
3. W optymalizacji topologicznej z zastosowaniem metamateriałów auksetycznych przyjęto trzy przypadki obciążeń. Warto byłoby rozwinąć, dlaczego ograniczono się do tego zestawu i jak wyniki mogłyby się zmienić przy szerszym zakresie analiz, np. przy uwzględnieniu biegu czy wchodzenia po schodach.
4. W rozprawie zabrakło głębszej analizy problemu warstwy kontaktowej pomiędzy protezą a podłożem. W rzeczywistych warunkach klinicznych ta strefa odgrywa istotną

rolę w transmisji sił i komfortu użytkowania, a w pracy została potraktowana w sposób uproszczony.

5. W algorytmie generowania geometrii protezy oparto się na parametryzacji kilku zmiennych konstrukcyjnych. Czy rozszerzenie tego zestawu (np. o kąt ustawienia części palcowej czy zróżnicowanie materiałowe) mogłoby jeszcze lepiej odwzorować biomechanikę naturalnej stopy.

Praca została przygotowana poprawnie pod względem językowym i redakcyjnym. Jednak w tekście pojawiają się drobne literówki i niekonsekwencje edycyjne, które wymagają korekty przed publikacją. Nie wpływają one na merytoryczną wartość rozprawy, ale ich usunięcie podniosłoby ostateczny poziom edytorski pracy.

6. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Biorąc pod uwagę podstawowy charakter przedstawionych badań kwalifikowałbym ją do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna* (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669). **Biorąc powyższe pod uwagę, stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Agaty Mrozek-Czajkowskiej do publicznej obrony.**

W związku z powyższym przedstawiam pozytywną konkluzję i uprzejmie wnoszę o przyjęcie przedmiotowej rozprawy doktorskiej oraz wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Agaty Mrozek-Czajkowskiej do kolejnych etapów przewodu doktorskiego - Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 roku poz. 478 ze zm.).

