

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda

Opole, 2026-06-25

Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn

Wydział Mechaniczny

Politechnika Opolska

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Nikhiel Tatke pod tytułem „A computational intelligence framework for PDE – constrained topology optimization”

Recenzję pracy wykonano na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna” Politechniki Śląskiej, dr hab. inż. Alicji Piaseckiej-Belkhat z dnia 23 kwietnia 2026 r. Promotorem recenzowanej rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Jarosław Kaczmarczyk.

1. Charakterystyka pracy

Projektanci starają się wykorzystać maksymalnie zastosowany materiał w celu uzyskania konstrukcji o jak najlepszych właściwościach. W tym celu wykorzystuje się różne metody optymalizacji z różnymi kryteriami i ograniczeniami. W związku z tym należy zastosować odpowiednie algorytmy w celu wykonania obliczeń optymalizacyjnych. Optymalizacja topologii konstrukcji ma na celu wyznaczenie optymalnego rozkładu materiału w zadanej przestrzeni projektowej przy uwzględnieniu równań równowagi oraz określonych kryteriów funkcjonalnych. W takich obliczeniach znaczący czas obliczeniowy wynika z konieczności wielokrotnego rozwiązywania dużych układów równań metodą elementów skończonych w każdej iteracji projektowej. Czas ten znacząco wzrasta przy rozdzielczościach istotnych z punktu widzenia inżynierskiego oraz w analizach trójwymiarowych, co ogranicza praktyczne zastosowanie optymalizacji topologii opartej na modelach o wysokiej rozdzielczości w eksploracji przestrzeni. Ze względu na rosnące możliwości stacji obliczeniowych i rozwój metod optymalizacyjnych, zagadnienie to jest ostatnio rozwijane w celu oszczędzania materiału przy zachowaniu wysokich właściwości, co ułatwia jego

Biurow Dziekana

wpłynęło dnia 03.07.2026
RDJM e 183151/2026
nr zał.

zastosowanie w konstrukcjach. Niniejsza rozprawa przedstawia wielopoziomowe podejście do optymalizacji topologii minimalizującej podatność przy globalnym ograniczeniu objętości w ramach liniowej teorii sprężystości, z weryfikacją prowadzoną w trakcie obliczeń. W związku z tym przedstawiona do recenzji praca pod tytułem „Struktura inteligencji obliczeniowej dla PDE – optymalizacji topologii z ograniczeniami” doskonale wpisuje się w aktualną tematykę badawczą.

Całość pracy doktorskiej została starannie przygotowana.

Recenzowana praca doktorska składa się z 6 numerowanych rozdziałów, streszczeń w języku angielskim i polskim, spisem rysunków, tabel, skrótów i oznaczeń przed zasadniczą częścią pracy oraz na końcu spisem literatury oraz 4 załącznikami. W streszczeniach nie wyróżniono tytułu pracy w języku polskim. Natomiast przy spisach symboli i oznaczeń nie zastosowano kolejności alfabetycznej, która to kolejność powinna być stosowana. W bibliografii zawierającej 134 cytowanych pozycji literatury, jedna z cytowanych prac jest współautorską pracą doktoranta.

Pierwszy rozdział zatytułowany jest „Wprowadzenie”. Rozdział ten podzielono na 7 klarownie przedstawionych podrozdziałów. Podrozdziały te dotyczą zarysu problemu i motywacji podjętej problematyki. Na tej podstawie sformułowano problem oraz przedstawiono cele badań, pytania badawcze. Następnie przedstawiono własny wkład oraz krótko scharakteryzowano poszczególne rozdziały pracy. Następnie przedstawiono przegląd literatury. Tym razem rozdział podzielono na 5 podrozdziałów. Z kolei te podrozdziały podzielono na punkty. Podrozdziały te dotyczą podstawy optymalizacji topologii, zastosowania uczenia maszynowego w optymalizacji topologii. Przedstawiono ponadto weryfikację i powtarzalność w optymalizacji topologii i na koniec wskazano na luki w badaniach w dostępnej literaturze dotyczącej tematyki pracy doktorskiej. W rozdziale 3 opisano szczegółowo zastosowaną metodologię badań z opisem sformułowanego problemu, opisem metody elementów skończonych oraz opisem metody regularyzacji, optymalizacji i integracji wielowiernościowej w architekturze U-Net. Z kolei w rozdziale 4 opisano otrzymane wyniki badań obliczeniowych. W tym rozdziale opisano problemy porównawcze, dyskretyzację oraz generowanie zbiorów danych. Następnie przedstawiono dwu- i trój-wymiarowe podejście do badań i sposób raportowania statystycznego. W rozdziale 5 przedstawiono wyniki obliczeń i ich dyskusję. W podrozdziałach 5.1 i 5.3 podjęto zagadnienia dwuwymiarowe, a w podrozdziałach 5.2 i 5.4 zagadnienia trójwymiarowe. Następnie przedstawiono syntezę przypadków krzyżowych i wskazówki praktyczne oraz ograniczenia. W ostatnim numerowanym rozdziale 6 przedstawiono wnioski oraz postawiono zadania na przyszłość. Rozdział ten potraktowano

dosyć szczegółowo. Brakuje jednak kilku wypunktowanych na końcu wniosków wynikających z pracy związanych z postawionymi celami w pracy. Wtedy praca byłaby klarowniejsza. Należy jednak zwrócić uwagę, na to, że postawiono zadania na przyszłość. Dzięki temu praca jest otwarta na zadania do rozwiązania na przyszłość.

2. Opinia o pracy odnośnie spełnienia warunków ustawowych

2.1. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej

Przegląd stanu wiedzy zawarty w rozdziale drugim pozwala potwierdzić duże rozeznanie Doktoranta w problemach dotyczących stanu wiedzy i stosowanych rozwiązań z zakresu optymalizacji konstrukcji w zagadnieniach inżynierskich. Przegląd literatury przedstawiony w tych pracach jest bardzo bogaty, chociaż zagadnienie to jest stosunkowo nowe przy zastosowaniu na realne konstrukcje, ale jak to przedstawiano cały czas rozwijane. Wykazano znaczenie i wagę tak zwanego uczenia maszynowych.

2.2. Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Doktorant wykazał się samodzielnością zarówno w zakresie przygotowania metodyki, jak i przeprowadzenia właściwych obliczeń i analiz i przedstawieniem uzyskanych rezultatów. Na tej podstawie Autor umiał dokonać właściwej analizy i dyskusji z przedstawieniem w pracy właściwego podsumowania.

2.3. Ocena oryginalnego rozwiązania problemu naukowego

Przedstawione osiągnięcia w ramach poszczególnych rozdziałów, a w szczególności rozdziałów 4 – 5 wskazują, jak to wykazano w charakterystyce pracy, na wkład naukowy niniejszej rozprawy doktorskiej, jej innowacyjność oraz zasadność podjętego tematu. Umiał rozwiązać problem optymalizacji topologicznej (frameworku), którego głównym celem jest przyspieszenie procesu obliczeniowego przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości i wiarygodności końcowych rozwiązań. Podstawą metody jest wykorzystanie siatek zgrubnych do wykonywania większości iteracji optymalizacyjnych oraz okresowa weryfikacja wyników na siatce dokładnej. Dzięki temu zaistniała możliwość znaczącego skrócenie czasu obliczeń bez istotnego pogorszenia parametrów konstrukcyjnych. Dodatkowo do frameworku zintegrowano architekturę sieci neuronowej U-Net. Jej zadaniem nie jest zastąpienie klasycznej optymalizacji, lecz generowanie lepszych rozwiązań początkowych. Sieć przewiduje bardziej

uporządkowany rozkład materiału, co może przyspieszyć osiągnięcie optymalnego projektu. Wszystkie predykcje U-Netu podlegają jednak identycznej procedurze weryfikacji jak rozwiązania generowane tradycyjnymi metodami, dzięki czemu niezawodność całego procesu pozostaje zachowana niezależnie od jakości prognoz modelu.

W pracy porównano cztery warianty metod. M1 stanowi klasyczną optymalizację na siatce dokładnej i pełni funkcję rozwiązania referencyjnego. M2 wykorzystuje jedynie siatkę zgrubną bez weryfikacji, co zapewnia najwyższe przyspieszenie, ale prowadzi do znaczącej utraty jakości. M3 jest podstawowym wariantem proponowanego frameworku wielowiernościowego z mechanizmem akceptacji i weryfikacji. M4 rozszerza metodę M3 o inicjalizację opartą na sieci U-Net. Wyniki eksperymentów pokazują, że metody M3 i M4 zapewniają najlepszy kompromis pomiędzy szybkością obliczeń a jakością końcowych rozwiązań, umożliwiając bezpieczne wykorzystanie modeli uproszczonych i uczenia maszynowego w optymalizacji topologicznej. Pomimo bardzo pozytywnej recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Nikhil Tatke, co napisano w charakterystyce pracy i najważniejszych osiągnięciach Doktoranta, kilka wątpliwości zamieściłem w charakterystyce pracy, jak również w uwagach i pytaniach dotyczących pracy.

3. Uwagi i pytania szczegółowe dotyczące pracy

Część uwag zawarłem w poprzednich punktach. Poniżej przytaczam inne zauważone błędy lub też pytania:

- W pracy podano zakres pracy w podrozdziale 1.7. Wcześniej przedstawiono cele badawcze i pytania naukowe. To jednak powinno być umieszczone po przeglądzie literatury i z niego wynikać. Należało wykazać, że w dostępnej literaturze nie ma proponowanych rozwiązań lub są one niedostatecznie rozwiązane;
- Autor dosyć dowolnie przedstawia nawiasy w całej pracy. To utrudnia czytanie i zrozumienie. Np. str.9₆, str.15¹² str.28₁₁ zastosowano [...]. To raczej zbiór a nie przedział. Jeżeli przedział to (...) lub <...>, w zależności od tego, czy brzegi należą do przedziału, czy też nie. Na str. 46, 48 zapisano (0, 1). Co te nawiasy w tym przypadku oznaczają? To samo dotyczy danych zapisanych w tabeli 4.1 i odpowiadających wartości na str. 57. Znowu na str. 49 zastosowano [...]. O co oznaczają symbole [] na str. 50, 61? W części pracy zastosowano znaki {...};
- zbyt łatwo w pracy stosowany jest znak mnożenia wektorowego „X” w miejscach, gdzie nie powinien być stosowany. Liczba elementów N zdefiniowanych na str.29, 30, 32, 37, 38, 44, 45, nie wynika z mnożenia wektorowego, a z normalnego mnożenia. Zupełnie niezrozumiałe jest

wykorzystanie tego symbolu na str.3⁴. Jeszcze bardziej niewłaściwe zastosowanie znaku „X” jest na str.48⁶ i 62⁵ Powinno być $5 \cdot 10^{-4}$. W rozdziale 5 często pojawia się znak X, który można by zapisać wyrazem „times”. Wtedy nie byłoby wątpliwości matematycznych;

- w pracy są określenia Chapter i Section. To powinno być uporządkowane według jednego systemu. Na przykład: Section, Sub-Section, Point, lub Chapter, Sub-Chapter, Point;

- na str. 35 po cytowanej literaturze [51, 127] zastosowano wielokropek Co to oznacza?

Przedstawione uwagi są z definicji uwagami dotyczącymi matematyki, ale to właśnie matematyka jest potrzebna do zastosowanych rozwiązań informatycznych, które ją wykorzystują. Te zapisy powinny być jednoznaczne i nie budzić wątpliwości w pracy.

4. Uwagi i wnioski ogólne

Z przedstawionej charakterystyki pracy oraz uwag, czy też pytań uzupełniających dotyczących pracy, wynika, że rozprawa wskazuje na bardzo duże rozeznanie problemu postawionego w pracy w zakresie optymalizacji konstrukcji. W szczególności należy zwrócić uwagę, że zdobytą wiedzę i doświadczenie doktorant wykorzystał do zastosowania swojej wiedzy w analizie optymalizacyjnej z zastosowaniem uczenia maszynowego. Nieliczne uwagi zawarte w recenzji mogą być przedmiotem analiz w dalszej działalności badawczej i publikacyjnej Doktoranta, a także mogą być przydatne w redagowaniu kolejnych prac naukowych. Tu należy zwrócić uwagę, że znaczna część uwag ma charakter pytań i sugestii do wykorzystania w przyszłości, a nie wprost krytykę recenzowanej rozprawy. W przyszłości w przypadku analizy badań Doktorant będzie musiał zwrócić lepszą uwagę na zapis matematyczny przedstawianych rozważań. Natomiast do najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych pracy można zaliczyć:

- **Opracowanie zweryfikowanego frameworku wielowiernościowego** - Zaproponowano nową metodę optymalizacji topologicznej, która łączy szybkie obliczenia na siatce zgrubnej z okresową weryfikacją na siatce dokładnej, zapewniając równowagę między szybkością a jakością rozwiązań.

- **Wprowadzenie mechanizmu akceptacji i cofania** - Opracowano skuteczne zabezpieczenie przed degradacją jakości wyników. Każde rozwiązanie generowane przez model uproszczony jest zweryfikowane, a w przypadku niespełnienia kryteriów jakościowych algorytm automatycznie wraca do ostatniego poprawnego stanu.

- **Uzyskanie znaczącego przyspieszenia obliczeń przy zachowaniu jakości wyników** - W problemach dwuwymiarowych osiągnięto przyspieszenie rzędu 2,1–2,3 razy względem

klasycznej optymalizacji, przy zachowaniu różnic podatności poniżej 1%, co potwierdza praktyczną użyteczność proponowanego podejścia.

- Bezpieczna integracja sztucznej inteligencji z optymalizacją topologiczną - Wykazano, że sieć U-Net może być wykorzystana do generowania lepszych punktów startowych bez utraty niezawodności procesu, ponieważ wszystkie predykcje podlegają tej samej procedurze weryfikacji co rozwiązania klasyczne.

- Kompleksowa walidacja metody na szerokim zbiorze testów - Przeprowadzono 142 eksperymenty obejmujące problemy dwu- i trój-wymiarowe oraz analizy wrażliwości parametrów. Wyniki potwierdziły skuteczność, niezawodność i odporność opracowanego frameworku w badanej klasie zagadnień optymalizacji topologicznej.

Po analizie pracy można ją pozytywnie ocenić zarówno w zakresie ogólnej wiedzy teoretycznej, umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, jak i znalezienia oryginalnego rozwiązania problemu naukowego. Dodatkowo należy wskazać, że recenzowana praca doktorska jest pracą interdyscyplinarną i mogłaby być ulokowana w dwóch trzech funkcjonujących dyscyplinach: Inżynieria Mechaniczna, Informatyka Techniczna czy nawet Matematyka. Z uwagi na to, że kwestie informatyczne i matematyczna są w pracy potraktowane zdecydowanie drugoplanowo jako narzędzie przy zastosowanych badaniach, to praca najlepiej lokuje się w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna tak jak została przesłana do recenzji. Nieścisłości matematyczne obniżają trochę jakość recenzowanej pracy, bo powodują niepewność w jej czytaniu i interpretacji.

5. Wniosek końcowy

Całość oceny rozprawy doktorskiej umożliwia sformułowanie wniosku o spełnienie w stopniu wystarczającym warunków określonych w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku z późniejszymi zmianami oraz dopuszczenie rozprawy mgr inż. Nikhil Tatke pod tytułem „A computational intelligence framework for PDE - constrained topology optimization” do publicznej obrony pracy doktorskiej na Politechnice Śląskiej w Dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Z poważaniem,

Prof. Tadeusz Łagoda