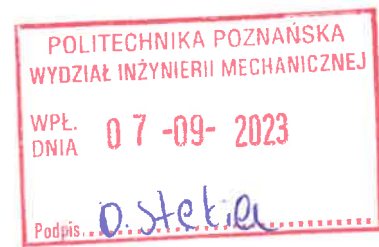


Prof. dr hab. inż. Bogdan Bochenek  
Katedra Mechaniki Stosowanej i Biomechaniki  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Krakowska



Kraków, 1 września 2023 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej

magistra inżyniera **Jana Polaka**

### **Building parametric geometric models for CAD systems based on topological optimization results**

#### Tematyka i zakres rozprawy

Pan magister Jan Polak prowadzi aktywną działalność badawczą w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Przedstawiona rozprawa doktorska jest podsumowaniem jego badań z ostatnich kilku lat. Tematyka pracy obejmuje szeroko rozumiane zagadnienia projektowania elementów konstrukcyjnych z wykorzystaniem optymalizacji topologicznej a na plan pierwszy wysuwają się dwa obszary badawcze rozwijane przez Autora. I tak, Autor buduje parametryczne modele struktur dla systemów CAD, na podstawie rozwiązań optymalizacji topologicznej i przy wykorzystaniu technik komputerowej analizy obrazu. To w połączeniu z opracowaną, niemal w pełni zautomatyzowaną, procedurą pozwala, przy wykorzystaniu otrzymanych rozwiązań, na przygotowanie modelu gotowego do wykonania za pomocą technik przyrostowych. Doktorant wykorzystuje w badaniach istniejące zaawansowane narzędzia obliczeniowe jak biomimetyczna metoda optymalizacji strukturalnej, zaawansowane generatory siatek metody elementów skończonych, czy algorytmy komputerowej analizy obrazu, a równocześnie rozwija również własne algorytmy obliczeniowe, łącząc wszystkie te elementy w system obliczeniowy.

Prowadzone badania mają wspólny cel, którym jest znalezienie efektywnych metod połączenia wyników zaawansowanej numerycznej analizy i optymalizacji elementów konstrukcji z procesem produkcji otrzymanych rozwiązań. Warto podkreślić, że przeniesienie rozwiązania numerycznego na gotowy produkt jest jednym z najważniejszych zadań w procesie projektowania inżynierskiego. Tematyka pracy wpisuje się zatem w bardzo aktualne zagadnienia obejmujące przemysłowe wykorzystanie nowoczesnych metod optymalizacji konstrukcji.

Rozprawa składa się z jedenastu rozdziałów, spisu literatury obejmującego 90 pozycji oraz dodatkowo, listy rysunków, listy tabel oraz objaśnienia

wykorzystywanych w pracy skrótowych nazw. Układ pracy jest następujący. Początkowe cztery rozdziały stanowią wprowadzenie do tematyki rozprawy. Autor przedstawia usytuowanie omawianych w pracy zagadnień szczegółowych na tle ogólniejszych zagadnień pokrewnych, między innymi wprowadzając w Rozdziale 3 pojęcie biomimetycznej optymalizacji konstrukcji a w Rozdziale 4 omawiając rozważany problem optymalizacji. W dalszych rozdziałach Doktorant skupia się na stronie merytorycznej rozprawy, w pierwszej kolejności przyglądając się generatorom siatek metody elementów skończonych. W efekcie, Rozdział 5 zawiera propozycje modyfikacji generatora siatki dopasowujące jego możliwości do specyfiki rozwiązywanych w pracy zagadnień. Następnie, w Rozdziale 6, Autor wprowadza stosowaną w komputerowej analizie obrazu transformację Hough-a i przedstawia możliwości jej wykorzystania do detekcji obiektów cylindrycznych, co bezpośrednio wiąże się z zagadnieniami omawianymi w dalszej części pracy. W kolejnym rozdziale pojawia się ujęcie szkieletowe pozwalające na przedstawienie rozważanego elementu w formie modelu zbudowanego z linii. Szkieletyzacja jest w pracy ważnym elementem budowy modelu CAD. W Rozdziale 8 omówiona jest propozycja ujęcia, określanego przez Autora, jako hybrydowe, włączonego w proces projektowania elementu konstrukcyjnego, docelowo pod kątem możliwości jego wykonania. Rozdział 9 poświęcony jest przykładom zastosowania proponowanych ujęć w procesie projektowania części mechanicznych. Rozdziały 10 i 11 stanowią podsumowanie pracy przedstawiając odpowiednio analizę otrzymanych wyników, sformułowane na tej podstawie wnioski oraz propozycje zagadnień do dalszych badań, i szerzej, możliwe kierunki rozwoju tematyki pracy.

### **Wartość merytoryczna rozprawy**

Współcześnie, jednym z ważniejszych obszarów projektowania inżynierskiego jest konstrukcja lekkich struktur mających dobre właściwości mechaniczne i wytrzymałościowe. Wykazujące wysoką sztywność a przy tym lekkie konstrukcje są często celem procesu projektowania. Oprogramowanie wykorzystujące efektywne algorytmy optymalizacyjne pomaga rozwiązywać tego typu zadania. Proces projektowania wymaga znalezienia, na ogół numerycznego, rozwiązania zadania optymalizacji a następnie dostosowania tego rozwiązania do określonego sposobu jego wytworzenia. Przeniesienie rozwiązania numerycznego na gotowy element konstrukcyjny staje się jednym z ważniejszych zadań w procesie projektowania inżynierskiego. Problematyka, którą Autor podjął w rozprawie, jest zatem aktualna, nowoczesna, cechuje się interdyscyplinarnością, ma wyraźny aspekt badawczy i jest również silnie ukierunkowana na zastosowania inżynierskie. Praca łączy inżynierię mechaniczną, informatykę, komputerową analizę obrazu i techniki wytwarzania przyrostowego. W obszarze obejmującym, szeroko rozumiane projektowanie elementów konstrukcji, praca zawiera co najmniej dwa elementy istotne z merytorycznego punktu widzenia. Po pierwsze Autor zbudował algorytm, który na podstawie rozwiązań zadania optymalizacji

topologicznej, przy zastosowaniu ujęcia szkieletowego, pozwala na generowanie parametrycznych modeli CAD. Drugim zadaniem, na którym skupił się Autor, jest opracowanie zautomatyzowanej procedury obliczeniowo projektowej do zastosowań inżynierskich, zorientowanej na przeniesienie numerycznego rozwiązania problemu optymalizacji na grunt inżynierski. Warto przy tym podkreślić, że ważnym elementem tej procedury jest wykorzystanie wygenerowanego przez Autora modelu parametrycznego. Praca jest zatem próbą wypełnienia luki pomiędzy rozwiązaniem numerycznym zadania projektowania optymalnego a jego praktyczną realizacją. Należy podkreślić, że próbą udaną.

Realizując pracę Autor połączył dostępne nowoczesne narzędzia obliczeniowe z własnymi algorytmami i w odniesieniu do przyjętej koncepcji badań opracował efektywne narzędzie projektowania.

Realizując pracę Autor opublikował artykuł: *From Structural Optimization Results to Parametric CAD Modeling - Automated, Skeletonization-Based Truss Recognition*, w którym przedstawił oryginalną koncepcję i wyniki badań dotyczących parametrycznego modelowania struktury z wykorzystaniem procesu szkieletyzacji czyli znalezienia liniowej reprezentacji struktury na podstawie cyfrowego przetwarzania obrazu. Można zatem przyjąć, że zaproponowane przez Autora zagadnienia obejmujące budowę modeli kratowych dla lekkich ażurowych konstrukcji generowanych w procesie optymalizacji i ich wykorzystanie w procesie projektowania zostały już na etapie recenzji wydawniczych ocenione pozytywnie.

Przedstawione w pracy zagadnienia nie należą do łatwych, zarówno z punktu widzenia rozwiązania problemu optymalizacji badanych struktur, prowadzenia numerycznych symulacji a także możliwości wykonania projektowanych elementów. Należy zatem podkreślić duży wysiłek Autora włożony w połączenie wszystkich aspektów badań. Droga od koncepcji, poprzez implementację numeryczną aż do procesu wytwarzania nie jest ani krótka ani prosta. Autorowi udało się połączyć dostępne narzędzia obliczeniowe z własnymi algorytmami i zaproponować spójną procedurę pozwalającą na praktyczne przemysłowe wykorzystanie nowoczesnych metod optymalizacji elementów konstrukcji. Całość rozprawy oceniam pozytywnie. Nieliczne uwagi, głównie o charakterze dyskusyjnym, przedstawiam poniżej.

### **Uwagi i komentarze**

W pracy brakuje rozdziału przedstawiającego sformułowanie rozwiązywanego zadania optymalizacji.

W zadaniach projektowania konstrukcji do zastosowań inżynierskich istotną rolę pełnią ograniczenia. Ten aspekt nie został uwypuklony w pracy, pojawiając się dopiero przy okazji omawiania przykładów.

Autor buduje narzędzia numeryczne łącząc dostępne programy z własnymi algorytmami. Wydaje się, że to istotne rozgraniczenie mogłoby być w pracy wyraźniej podkreślone.

Chcąc pokazać efektywność opracowanych procedur można byłoby przeprowadzić porównanie wybranego dostępnego rozwiązania 3D, znalezionej innymi metodami, z uzyskanym przy zastosowaniu proponowanego ujęcia.

Celem Autora było opracowanie zautomatyzowanej procedury, która zastosowana do wygenerowanego rozwiązania numerycznego pozwala na znalezienie modelu gotowego do produkcji przy wykorzystaniu odpowiedniej metody wytwarzania. Korzyści z automatyzacji procedury są oczywiste, ale czy dostosowanie numerycznego rozwiązania do produkcji w sposób tradycyjny przez projektanta mogłoby pozwolić na uzyskanie rozwiązania lepiej dopasowanego do przyjętych założeń projektowych?

### **Poprawność redakcyjna rozprawy**

Ogólne wrażenie z lektury pracy jest bardzo dobre. Praca jest dobrze napisana i starannie zredagowana. Moim zdaniem można było jedynie nieco inaczej opracować początkowe i końcowe rozdziały pracy, na przykład połączyć rozdziały 1 i 2, 3 i 5 oraz 10 i 11. Rysunki są czytelne a ich opisy wyczerpujące. Autor nie ustrzegł się jedynie drobnych błędów redakcyjnych.

Wzory (3.2) i (3.3) na stronie 10 są identyczne. Czy tak miało być?

Rysunek 5.1 jest powtórzeniem Rysunku 3.1.

We wzorze (5.1), praktycznie powtórzonym jako (6.6) pojawia się odwołanie do punktów a, b i c bez ilustracji o jakie punkty chodzi. W tekście w Rozdziale 5.1 Autor wskazuje na punkty A, B i C. Dodatkowo, ta sama wielkość jest oznaczana jako N lub n.

W kilku miejscach pracy, szczególnie w Rozdziale 6, we wzorach Autor nie rozróżnia wektorów i skalarów. Wydaje się, że zastosowanie pogrubionej czcionki do oznaczenia wektorów i macierzy rozwiązałoby problem.

We wzorze (6.2) można było przyjąć inne oznaczenie dla wektora i osi układu współrzędnych.

Autor odwołuje się do układu (X, Y, Z), natomiast stosuje w zapisie indeksy (x, y, z).

Strona 29: Równość  $f_i = p_i$  należałoby zapisać przy użyciu symboli.

W Rozdziale 7.4 Autor zastosował opisowe nazwy wielkości czyli oznaczenia typowe raczej do kodu komputerowego (7.1)-(7.4). Wydaje się, że bardziej pasowałoby zastosowanie konsekwentnie oznaczeń literowych.

Zastosowana we wzorze (7.2) oznaczenie  $\alpha$  było już wcześniej wykorzystane dla innej wielkości, wzory (6.2) i (6.3).

Strona 38: Autor wprowadza oznaczenia  $\sigma_{dir}$  i  $\sigma_r$  nie objaśniając ich znaczenia.

Strona 42: Zamiast *volute* raczej *volume*.

Strona 42: Zamiast *Fustion* raczej *Fusion*.

Strony 51 i 52: Wielkości w Tabelach 9.1 i 9.2 wymagałyby bardziej szczegółowego objaśnienia. Jak interpretować **a** i **b**?

Strona 54: Zamiast *Tables 9.3, 9.3, 9.5* raczej *Tables 9.3, 9.4, 9.5*

Strona 60: Podpis pod Rysunkiem 9.19, zamiast ©, **(d)** raczej **(c, d)**.

Strona 83: Na Rysunku 9.45 brakuje oznaczeń **(a)** i **(b)**.

Strona 83: Na Rysunku 9.46 brakuje opisów przypisanych do rysunków **(a)** i **(b)**.

Strona 84: Podpis pod Rysunkiem 9.47, zamiast *processes* raczej *processed*.

Dobrze byłoby w całej pracy ujednoczyć sposób przedstawienia wymiarów wielkości wymiarowych: czcionka prosta lub pochyła, z odstępem lub bez odstępu. Dodatkowo, chyba lepiej zrezygnować z symbolu  $\times$  przedstawiając wartości liczbowe, szczególnie, że symbol jest również wykorzystywany w innym miejscu jako iloczyn wektorowy.

## **Wniosek końcowy**

Recenzowana rozprawa doktorska magistra Jana Polaka stanowi interesujące studium poświęcone nowoczesnym metodom inżynierskiego projektowania. Jest dobrze umotywowanym oryginalnym opracowaniem naukowym. Autor wykazał się wiedzą z zakresu szeroko rozumianej inżynierii mechanicznej oraz dużą biegłością jeżeli chodzi o posługiwanie się narzędziami numerycznej analizy oraz umiejętnością programowania. Doktorant umiejętnie połączył zadanie optymalizacji topologicznej złożonych struktur z problemem dostosowania generowanych rozwiązań do możliwości ich wytwarzania, otrzymując bardzo przydatne narzędzie wspomagające pracę współczesnego inżyniera projektanta.

Praca ma przede wszystkim walor badawczy, stanowi istotny wkład w rozwój podjętej tematyki badań, pokazując możliwości zastosowania efektywnych narzędzi analizy i optymalizacji. W mojej ocenie Autor zaznaczył swój wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna a przedstawione ujęcia oraz ich potencjał badawczy poszerzają wiedzę współczesnego inżyniera.

Warte podkreślenia jest również to, że przygotowując rozprawę doktorską magister Jan Polak opublikował część wyników w pracy *Polak J., Nowak M., From Structural Optimization Results to Parametric CAD Modeling-Automated, Skeletonization-Based Truss Recognition, Applied Sciences, 2023, 13, 5670*. Dodatkowo, w bazie Scopus obecne jest również inne opracowanie Autora, wiążące się z tematyką rozprawy: *Polak J., Nowak M., The Efficient Trabecular Bone Remodeling Numerical Tool Enabling Multiple Load Case Simulation, Advanced Structured Materials, 2022, 175, 459-471*. Autor może pochwalić się też kilkoma opracowaniami w wydawnictwach nieindeksowanych. Zgromadzenie

dorobku publikacyjnego, nawet jeżeli na razie raczej skromnego, dobrze świadczy o Doktorancie i potwierdza jego aktywność naukową.

Podsumowując, uwzględniając wszystkie aspekty oceny recenzowanej rozprawy, stwierdzam, że spełnia ona warunki stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy i w związku z tym wnioskuję o dopuszczenie magistra Jana Polaka do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Uważam również, że warto rozważyć możliwość wyróżnienia rozprawy. Praca magistra Jana Polaka zawiera wartościowe i oryginalne rozwiązania złożonych zadań analizy i projektowania, ma przede wszystkim walor poznawczy ale też bardzo mocno eksponowany walor użytkowy. Reprezentuje wysoki poziom merytoryczny i równocześnie jest wartościowym narzędziem, które może znaleźć zastosowanie w praktyce inżynierskiej. Nie bez znaczenia jest również i to, że wyniki badań Autora zostały już częściowo przedstawione w indeksowanych publikacjach.



Bogdan Bochenek