

Kielce, dn. 3 stycznia 2024 r.

Dr hab. inż. Dariusz Bojczuk, prof. uczelni
Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego
Katedra Inżynierii Produkcji
Politechnika Świętokrzyska
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce



Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Konrada Łyducha
pt. „Automatyzacja procesu interpretacji wyników
optymalizacji topologicznej”

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została przygotowana w Zakładzie Inżynierii Wirtualnej wchodzącym w skład Instytutu Mechaniki Stosowanej znajdującego się na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej w Poznaniu. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Michał Nowak.

Recenzję opracowałem na podstawie pisma Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP, z dn. 03 listopada 2023 r., zwracającego się do mnie na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dn. 02 listopada 2023 r. nr 9/III/11/2023, z prośbą o podjęcie się recenzowania wyżej wyszczególnionej rozprawy doktorskiej.

2. Charakterystyka treści rozprawy

Optymalizacja konstrukcji, a w szczególności optymalizacja topologiczna są nadal przedmiotem intensywnych badań w wielu ośrodkach naukowych na świecie. Stosowane algorytmy optymalizacji topologii są coraz bardziej

skuteczne i pozwalają na wyeliminowanie wcześniej pojawiających się błędów np. efektu szachownicy, a ponadto zostały wprowadzone do wielu systemów komercyjnych projektowania konstrukcji. Niemniej jednak uzyskane rozwiązania zazwyczaj nie spełniają wymagań technologicznych. W recenzowanej pracy podjęto aktualny problem badawczy dotyczący automatyzacji procesu odpowiednio wiernego przeniesienia wyników optymalizacji topologicznej do środowiska CAD.

Niniejsza praca doktorska liczy łącznie 131 stron i składa się ze strony tytułowej, dedykacji, spisu treści, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz dziewięciu rozdziałów i bibliografii. Rozdziały 1, 2, 3, 4 zawierają kolejno wstęp, podstawy optymalizacji konstrukcji, sformułowanie celu i zakresu pracy oraz przedstawienie oryginalnej idei rozwiązania postawionego problemu badawczego. Następnie, w rozdziałach 5, 6, 7 przedstawiono budowę algorytmu interpretacji wyników optymalizacji topologicznej, jego działanie na wybranych przykładach oraz zestawienie uzyskanych wyników. Dwa ostatnie rozdziały, czyli rozdziały 8 i 9, są poświęcone dyskusji i wnioskowi oraz podsumowaniu.

W kolejnych rozdziałach rozprawy doktorskiej Autor analizuje następujące zagadnienia:

- W rozdziale 1 *Wstęp* w jego pierwszej części, Autor dokonuje przeglądu literatury wykazując potrzebę podjęcia dalszych badań w zakresie automatyzacji procesu interpretacji wyników optymalizacji topologicznej w systemie CAD w celu uzyskania bardziej zadawalających wyników pod względem stopnia zautomatyzowania, ergonomii oraz jakości otrzymywanych rezultatów. Ponadto, zawarto tutaj krótkie omówienie treści kolejnych rozdziałów pracy.
- W rozdziale 2 *Podstawy teoretyczne* najpierw przedstawiono ogólne sformułowanie problemów optymalizacji, krótki przegląd metod ich rozwiązywania oraz przykłady zastosowań, także w inżynierii mechanicznej. Następnie omówiono problem optymalizacji strukturalnej oraz jego rodzaje czyli optymalizację wymiaru, kształtu i topologiczną. W dalszym ciągu uwaga została skoncentrowana na optymalizacji

topologii. Przedstawiono podstawowe sformułowania tego problemu oraz omówiono typy algorytmów, poświęcając najwięcej uwagi najbardziej popularnej obecnie metodzie SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization). Dalsze rozważania dotyczyły wybranych przykładów zastosowania optymalizacji topologicznej w motoryzacji, lotnictwie oraz medycynie. Następnie, poddano krytycznej analizie programy komercyjne oferujące optymalizację topologiczną takie jak SolidWorks, ABAQUS, Ansys, Altair Inspire porównując ich cechy, funkcje oraz uzyskiwane przy ich użyciu rezultaty. Podkreślono, że wynik optymalizacji topologicznej jest tylko sugestią rozwiązania, która po przeniesieniu do środowiska CAD, wymaga zapewnienia technologiczności oraz odpowiedniego zredukowania kosztu i czasu wyprodukowania. W dalszej kolejności omówiono, na podstawie literatury, metody interpretacji wyników optymalizacji topologicznej wyróżniając metodę szkieletonizacji (jednowymiarową), metodę powierzchniową (dwuwymiarową) oraz metodę objętościową (przestrzenną), jednocześnie zwracając uwagę na niedostatki konkretnych propozycji rozwiązań oraz niewystarczający stopień ich automatyzacji.

- W rozdziale 3 *Cel i zakres pracy* jako główne zadanie niniejszej rozprawy doktorskiej wymieniono opracowanie autorskiego algorytmu automatyzacji procesu odpowiednio wierne przeniesienia wyników optymalizacji topologicznej do środowiska CAD przy zapewnieniu dostępu do drzewa operacji CAD na poziomie wszystkich działań tworzących geometrię konstruowanego elementu, a jednocześnie przy możliwie najmniejszej liczbie operacji wykorzystywanych w tym procesie. Ponadto, przedstawiono zakres prac służących realizacji postawionego celu.
- W bardzo krótkim rozdziale 4 *Istota pomysłu na oryginalne rozwiązanie postawionego problemu badawczego* przedstawiono główną ideę realizacji procesu interpretacji wyników optymalizacji topologicznej polegającą na zastosowaniu iteracyjnego naprzemiennego procesu

dodawania oraz usuwania materiału za pomocą odpowiednio określonych operacji.

- Z kolei, rozdział 5 *Budowa algorytmu interpretacji wyników optymalizacji topologicznej* poświęcono omówieniu opracowanemu w ramach niniejszej pracy całkowicie nowemu algorytmowi, który podzielono na dwie części, a mianowicie część „definiującą” oraz część „wykonawczą”. Część „definiująca” została wykonana przy użyciu języka programowania Python. Najpierw wczytywane są informacje o węzłach siatki elementów skończonych rozwiązania otrzymanego w wyniku optymalizacji topologicznej oraz następuje konwersja tej siatki, jeżeli to wcześniej nie zostało wykonane, do siatki sześćściennej. Następnie wyznaczane są węzły określające materiał, który zostanie usunięty za pomocą operacji wyciągnięcia/wycięcia kolejno otworów przelotowych, otworów nieprzelotowych oraz szablonów geometrii graniastosłupa/cylindra i ostrosłupa/stożka. Potem, w każdym z tych trzech przypadków, dokonuje się przetworzenia węzłów w celu określenia obrysu szkicu wycinanego materiału przy zapewnieniu odpowiednio zminimalizowanej liczby tych węzłów.

Z kolei część „wykonawczą” stanowi makro napisane w systemie CAD SolidWorks przy zastosowaniu środowiska programistycznego VB.NET. Jej celem jest zautomatyzowane odtworzenie modelu uzyskanego przy użyciu optymalizacji topologicznej, za pomocą operacji CAD wyciągnięcia/wycięcia otworów przelotowych, nieprzelotowych oraz otworów dopasowanych do szablonu graniastosłupa/cylindra lub ostrosłupa/stożka. Ponadto, usuwane są fragmenty niepowiązane z główną częścią modelu. Dodatkowo, istnieje też możliwość wprowadzenia do końcowego rozwiązania odpowiednich zaokrągleń.

- W rozdziale 6 *Wyniki opracowanej procedury* rozpatrzono aż czternaście różnorodnych przykładów zastosowań dla których każdorazowo zdefiniowano warunki brzegowe poprzez określenie obciążeń i warunków podparcia, zaś w jednym z nich założono dwa przypadki obciążenia (tzw. multiple load case). Dla każdego z zadań przeprowadzono optymalizację

topologiczną, oraz wykonano, będącą głównym przedmiotem rozważań niniejszej pracy, zautomatyzowaną procedurę interpretacji wyników optymalizacji topologicznej. Następnie dokonano porównania kształtów uzyskanych projektów przed realizacją i po realizacji opracowanego algorytmu, pokazując jednocześnie stan geometrii po przeprowadzeniu kolejnych operacji CAD wyciągnięcia/wycięcia oraz operacji CAD dodania zaokrągleń. Dokonano również porównania modeli otrzymanych po wykonaniu optymalizacji topologicznej oraz po zrealizowaniu procedury interpretacji ze względu na charakterystyki masy, bezwładności, stanu naprężenia oraz stanu przemieszczenia. Podano także zestawienia obrazujące liczbę wykonanych operacji CAD odpowiedzialnych za usuwanie materiału, ilość usuniętej masy w zależności od zastosowanej operacji oraz zestawienie czasu pracy algorytmu dla poszczególnych problemów.

- W rozdziale 7 *Zestawienie wyników dla modyfikowanych modeli* została zaprezentowana funkcjonalność sformułowanego algorytmu zautomatyzowanej interpretacji polegająca na dostępie do drzewa operacji CAD w celu poprawy własności uzyskanych projektów. W przypadku pięciu spośród czternastu modeli okazało się, że po użyciu TOCRIM (Topology Optimization CAD Result Interpretation Method) nastąpił znaczny wzrost maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa-Hencky'ego. W celu poprawy tych projektów, wykorzystując drzewo operacji, zmieniono szkice części operacji bądź je wycofano co pozwoliło na znaczącą, korzystną zmianę własności wytrzymałościowych modyfikowanych modeli. Następnie dokonano porównania projektów przed i po modyfikacji ze względu na charakterystyki kształtu, mas, momentów bezwładności, przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych.
- W krótkim rozdziale 8 *Diskusja i wnioski* Autor rozprawy podkreśla, że cele postawione w rozdziale 3 zostały zrealizowane. Opracowano w pełni zautomatyzowany proces przeniesienia wyników optymalizacji topologicznej do środowiska CAD. Uzyskane w ten sposób modele

posiadają drzewo operacji CAD, a ograniczenie się do niewielkiej liczby operacji pozwoliło na znaczne zredukowanie stopnia skomplikowania procesu. Zwrócono także uwagę, że w opracowanej metodzie pomimo uzyskiwania dosyć dobrych wyników, można jeszcze wprowadzić pewne zmiany. Zaproponowano zastosowanie większej liczby operacji CAD, na przykład takich jak „Wycięcie przez wyciągnięcie po profilach” czy „Elementy sterowania produkcji”. Ponadto, Autor podkreśla, że opracowany w rozprawie algorytm został przygotowany dla środowiska CAD, którego reprezentantem jest SolidWorks, ale może być dostosowany do innych popularnych programów używających środowiska CAD np. takich jak Inventor czy Catia.

- W rozdziale 9 *Podsumowanie* Doktorant podkreślając to, że cele rozprawy zostały osiągnięte, przedstawia zestawienie działań wykonanych w trakcie realizacji pracy doktorskiej. Ponadto, wstępnie określa kierunki dalszych badań, które pozwoliłyby na zwiększenie skuteczności stworzonej w tej dysertacji metody.

W dalszej kolejności została zamieszczona bibliografia obejmująca łącznie 105 pozycji, w tym 18 spośród nich są stronami internetowymi. Wszystkie pozycje w pełni korespondują z treścią rozprawy i stanowią niezbędny materiał uzupełniający. Jednak, żadna z nich nie jest ani autorstwa ani współautorstwa Doktoranta.

3. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy

Rozprawa zawiera sporo drobnych błędów i niedociągnięć redakcyjnych, a mianowicie:

1. Rysunki stanowią integralną część pracy. Dlatego w tekście powinny się pojawić odniesienia do wszystkich rysunków, ale niestety, w wielu przypadkach, to nie ma miejsca.
2. W pracy przyjęto różne sposoby odwoływania się do bibliografii. W pewnych przypadkach są podawane tylko numery prac, w innych pojawiają się też nazwiska Autorów, co moim zdaniem jest dopuszczalne. Ale ponadto, w niektórych przypadkach przy nazwiskach

występuje określenie „Panowie” i to pisane w pewnych miejscach z wielkiej litery, a w pewnych z małej (por. str. 31 oraz str. 32). Moim zdaniem takie rozróżnienie Autorów nie powinno występować.

3. Tłumaczenie niektórych słów z języka angielskiego na język polski budzi moje wątpliwości np. słowo „solid” w nazwie metody SIMP przetłumaczono jako „trwały”.
4. W kilku przypadkach wystąpiły błędy stylistyczne pogarszające czytelność odpowiednich fragmentów rozprawy. M.in. ma to miejsce na następujących stronach: 8, 11, 15, 17, 29, 51, itd.
5. W niektórych zdaniach używana jest nadmierna liczba przecinków np. na str. 10, 125.
6. Wątpliwości budzą określenia „pracochłonność konstruktorów” (str. 8), „cel funkcji” (str. 10).
7. W przynajmniej kilkudziesięciu miejscach błędnie zamieniono końcówkę słowa „-e” na „-ę”, zaś w jednym przypadku na odwrót czyli „-ę” na „-e” (na str. 123 zamiast „edycje” powinno być „edycję”).
8. Na kilku stronach wewnątrz odpowiednich rozdziałów czy podrozdziałów występują puste przestrzenie. Podobnie, na str. 8 jedna z linii zawiera tylko jedno słowo ze środka zdania.
9. Na str. 6 (trzecia linia od końca w czwartym akapicie) przy pierwszym odniesieniu do naprężeń σ zabrakło określenia, że chodzi tutaj o naprężenia zredukowane.

Oprócz wymienionych dotychczas spostrzeżeń, w trakcie zapoznawania się z treścią pracy nasunęły mi się komentarze oraz uwagi krytyczne, które zostały przytoczone poniżej.

1. Podział metod optymalizacji przedstawiony na str. 10 sprawia wrażenie przypadkowości i na pewno nie jest wyczerpujący. Niejasne są kryteria jego przeprowadzenia.
2. Opis sformułowania problemu optymalizacji topologicznej przedstawiony na podstawie pracy [5], na str. 13-14, jest niejasny. Autor nie precyzuje jaką energię wyraża wzór 1), opis wielkości u oraz v podany pod tym wzorem nie jest właściwy. Brakuje rysunku objaśniającego przyjęte

- oznaczenia. Z kolei, wzór 2) nie wyraża jak to zostało podane w pracy „liniowej postaci obciążenia”.
3. Z analizy wzorów 11) oraz 12) moim zdaniem wynika, że najmniejsza wartość współczynnika kary dla problemów dwuwymiarowych wynosi $p=3$, zaś dla problemów trójwymiarowych $p=2$ czyli inaczej niż zostało zapisane na str. 19 pracy.
 4. Na str. 20 przy zapisie jednostki dotyczącej zużycia paliwa zamiast „L” powinno być „l”.
 5. Wzory 17) oraz 18) moim zdaniem nie są prawidłowe. Przykładowo, aby uzyskać wartości m_{n_alg} przedstawione w Tablicy 3 należałoby w liczniku wzoru 18) zamiast m_{so} użyć $PPF \cdot m_{so}$. Ogólnie, wyniki zapisane w Tablicy 3 nie są zgodne ze wzorami 17) oraz 18).
 6. Opis wzoru 13) i jego zapis nie są zgodne ze sobą. Zgodnie z opisem w_g powinno przyjmować wartość 0 lub 1. Zatem wzór 13) (a także 14)) powinien być inaczej zapisany.
 7. Autor w wielu miejscach stosuje wielkości uśrednione, to jednak nie precyzuje jakiego rodzaju średnich używa.
 8. Podpis pod rys. 167 nie jest prawidłowy, a w każdym bądź razie nie jest zgodny ze wzorem 20), gdyż dotyczy całego ciała o masie m . Ponadto na rysunku użyto oznaczenia „x”, zaś w podpisie „X”.
 9. Wydaje się, że kolumny z danymi dotyczące I_{alg_sr} oraz I_{so_sr} , przedstawione w Tablicy 4 na str. 99, zostały przestawione.
 10. Uważam użycie średniej wartości wszystkich wyrazów tensora momentów bezwładności jako miary używanej do porównania modeli jako poważny błąd merytoryczny, gdyż taka wartość zależy od wyboru układu współrzędnych. Moim zdaniem jako właściwą miarę najlepiej byłoby przyjąć sumę (lub średnią arytmetyczną) wyrazów na przekątnej macierzy stanowiącej reprezentację tensora momentów bezwładności w danym prostokątnym układzie współrzędnych, najlepiej o początku w środku ciężkości (czyli w układzie tzw. osi centralnych). Chciałbym tutaj zwrócić uwagę, że taka suma jest niezmiennikiem tensora

momentów bezwładności ze względu na transformacje ortogonalne odpowiadające obrotowi układu współrzędnych.

4. Ocena pracy

Praca doktorska mgr inż. Konrada Łyducha stanowi oryginalne rozwiązanie aktualnego i ważnego z inżynierskiego punktu widzenia problemu badawczego. Doktorant opracował autorski algorytm automatyzacji procesu interpretacji wyników optymalizacji topologicznej i zilustrował jego możliwości i skuteczność na czternastu różnorodnych przykładach.

Należy podkreślić, że zagadnienie naukowe zostało wystarczająco jasno przedstawione, a postawiony cel osiągnięty. Układ rozprawy jest przejrzysty. Wadą pracy jest jednak jej strona redakcyjna. Wprawdzie została napisana w miarę zrozumiałym językiem, to niektóre jej fragmenty mogłyby być przedstawione w bardziej jasny sposób. Ponadto, dysertacja zawiera dużą ilość tzw. „literówek”, pojawiają się też błędy stylistyczne, interpunkcyjne czy też drobne pomyłki bądź nieścisłości. Należy jednak podkreślić, że te niedociągnięcia wprawdzie pogarszają czytelność rozprawy to moim zdaniem nie wpływają w istotny sposób na jej wartość merytoryczną.

Do najważniejszych osiągnięć Autora związanych z realizacją niniejszej rozprawy chciałbym w szczególności zaliczyć:

- sformułowanie autorskiego algorytmu automatyzacji procesu przeniesienia wyników optymalizacji topologicznej do środowiska CAD zapewniającego wystarczająco dokładne wyniki przy umożliwieniu dostępu do drzewa operacji CAD oraz stosowaniu relatywnie małej liczby operacji CAD;
- opracowanie oprogramowania realizującego przy użyciu programu SolidWorks odpowiednio wierne odtworzenie wyniku optymalizacji topologicznej w środowisku CAD;
- przeprowadzenie testów skuteczności i wydajności opracowanej w pracy metody na czternastu, różnych pod względem stopnia złożoności, przykładach;

- opracowanie, przy wykorzystaniu dostępu do drzewa operacji CAD, metody modyfikacji projektów uzyskanych po przeniesieniu do środowiska CAD, ale niespełniających pewnych wymagań czy warunków np. wytrzymałościowych.

Należy ponadto podkreślić, że mgr inż. Konrad Łyduch wykazał się umiejętnością samodzielnego stawiania problemów naukowych i ich rozwiązywania przy wykorzystaniu zaawansowanej znajomości zagadnień z zakresu projektowania inżynierskiego, metod komputerowych w mechanice konstrukcji, teorii i metod optymalizacji, algorytmów optymalizacji, itd. Poza tym, pokazał wysoką sprawność w przedmiocie samodzielnego opracowywania procedur przydatnych w rozwiązywaniu konkretnych problemów z zakresu projektowania inżynierskiego.

5. Wniosek końcowy

Niniejszą pracę, moim zdaniem, bezsprzecznie należy zaliczyć do dyscypliny inżynieria mechaniczna. W trakcie jej realizacji Doktorant wykazał się znaczną wiedzą w zakresie mechaniki konstrukcji, metod optymalizacji w tym optymalizacji topologicznej, znajomości i umiejętności posługiwania się oprogramowaniem komercyjnym w zakresie analizy i projektowania konstrukcji, ale w szczególności umiejętnością samodzielnego opracowywania złożonych programów komputerowych. Pozwoliło Mu to na rozwiązanie konkretnego problemu badawczego dotyczącego opracowania algorytmu realizującego w pełni zautomatyzowany proces interpretacji wyników optymalizacji topologicznej. Sformułowane cele pracy zostały w pełni zrealizowane. Zamieszczone w recenzji uwagi krytyczne nie obniżają w istotny sposób walorów naukowych recenzowanej dysertacji.

Na podstawie przeprowadzonej oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Konrada Łyducha pt. „Automatyzacja procesu interpretacji wyników optymalizacji topologicznej” stwierdzam, że spełnia ona wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim przedstawione w art.13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz. U. z 2017, poz. 1789 z późn. zm.).

W związku z moją pozytywną oceną rozprawy wnoszę do Rady
Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej w Poznaniu
o dopuszczenie mgra inż. Konrada Łyducha do publicznej obrony.

Dariusz Bojczuk.....

Dr hab. inż. Dariusz Bojczuk, prof. uczelni

