

dr hab. inż. Łukasz Jankowski, prof. IPPT PAN
Zakład Technologii Inteligentnych
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
ul. Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa
email: ljank@ippt.pan.pl

Warszawa, 27 kwietnia 2021 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Marka Krzywobłockiego
pt. „Optymalne projektowanie struktur energochłonnych pojazdów
z wykorzystaniem metody makro elementów”

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo nr SiMR-29/3/2021 Pana dr. hab. inż. Piotra Przybyłowicza, prof. PW, Dziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej, z dnia 2 marca 2021 r. i dołączona do niego rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marka Krzywobłockiego pt. „Optymalne projektowanie struktur energochłonnych pojazdów z wykorzystaniem metody makro elementów”.

Praca powstała w Zakładzie Samochodów Instytutu Pojazdów. Promotorem Doktoranta jest Pan prof. dr hab. inż. Mariusz Pyrz.

2. Zasadność podjęcia tematu

Jako cele swojej pracy Doktorant podaje

opracowanie metody obliczeniowej umożliwiającej wyznaczanie optymalnych parametrów projektowych struktur energochłonnych stosowanych w budowie nadwozi samonośnych pojazdów, bazującej na obliczeniach wytrzymałościowych prowadzonych za pomocą metody makro elementów oraz idei uproszczonego modelowania zjawisk dynamicznych

oraz „oszacowanie skuteczności, wydajności i praktycznych aspektów proponowanego podejścia”. Główną tezą rozprawy jest natomiast stwierdzenie:

Optymalny dobór parametrów konstrukcji struktur energochłonnych pojazdów na wstępnym etapie projektowania można efektywnie określić za pomocą metody makro elementów sprzężonej z odpowiednimi procedurami optymalizacyjnymi.

Cele i teza pracy zostały sformułowane poprawnie i precyzyjnie. Temat wpisuje się w ważny obszar światowej nauki i techniki związany z analizą i projektowaniem konstrukcji inżynierskich podlegających obciążeniom typu udarowego. Głównym zadaniem jest optymalizacja procesu udaru oraz maksymalizacja energochłonności konstrukcji (ang. crashworthiness). Obszar ten stanowi istotny fragment żywego nurtu badawczego związanego z zagadnieniami optymalizacji konstrukcji, jednak – w odróżnieniu od klasycznych sformułowań – dotyczy obciążeń nie statycznych, lecz dynamicznych o charakterze udarowym, oraz modeli silnie nieliniowych. Aktualność tematyki potwierdza fakt

publikacji przez Doktoranta częściowych wyników rozprawy w dwóch uznanych, światowych czasopismach naukowych oraz istotna cytowalność tych publikacji. Poza czysto naukowym aspektem rozprawy należy podkreślić również jej potencjał praktyczny i aplikacyjny. Podjęcie tak określonej tematyki badań należy uznać za w pełni uzasadnione.

3. Zakres i treść rozprawy

Rozprawa liczy 154 strony i jest sformułowana w języku polskim. Struktura rozprawy jest czytelna i właściwie dobrana do prezentowanych treści. Zasadnicza jej część zawiera się w Rozdziałach 2–6, poprzedzonych krótkim streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem symboli oraz wprowadzeniem, a zakończonych podsumowaniem i obszernym spisem literatury. Bibliografia liczy 118 pozycji, w tym 2 pozycje autorstwa Doktoranta, opublikowane w wiodących czasopismach z aktualnej listy czasopism punktowanych MNiSW (140 i 100 pkt.) i indeksowane w bazach bibliograficznych Scopus i Web of Science.

Rozdział 1 (*Wprowadzenie*) to zwięzłe, ogólne wprowadzenie do rozprawy. Doktorant charakteryzuje zakres tematyczny pracy, umieszcza go w szerszym kontekście naukowym i techniczno–przemysłowym oraz przedstawia motywację, cele i tezy pracy.

Rozdział 2 (*Konstrukcje energochłonne w pojazdach*) zwięzłe charakteryzuje podstawowe zagadnienia związane z bezpieczeństwem biernym pojazdów. Doktorant przywołuje szereg pozycji literaturowych dotyczących procesu projektowania i optymalizacji konstrukcji nośnej pojazdów z uwagi na kryteria istotne w wypadku typowych zdarzeń ruchu drogowego. Systematycznie przedstawione przykłady dotyczą kolejnych istotnych elementów nadwozia. Następnie omówione zostają typowe biomechaniczne i mechaniczne kryteria projektowania struktur energochłonnych pojazdów. Ostatnia część to obszerny przegląd światowej literatury naukowej dotyczącej optymalizacji energochłonności konstrukcji cienkościennych oraz wykorzystywanych w tym celu metod modelowania i optymalizacji.

W Rozdziale 3 (*Mechanizmy progresywnej deformacji absorberów energii*) Doktorant analizuje podstawowe zjawiska zaobserwowane doświadczalnie podczas osiowego zgniatania cienkościennych absorberów energii oraz przedstawia i porównuje trzy sposoby modelowania tego zjawiska: (i) modele wykorzystujące analityczny opis charakterystycznych typów deformacji i mechanizmów absorpcji energii przedstawiony w pracach W. Abramowicza i T. Wierzbieckiego; (ii) typowe modele wykorzystujące metodę elementów skończonych; (iii) modele wykorzystujące metodę makro elementów, czyli wyizolowanych fragmentów konstrukcji podlegających typowym, charakterystycznym mechanizmom deformacji, wprowadzoną przez W. Abramowicza i T. Wierzbieckiego.

Rozdział 4 (*Środowisko Visual Crash Studio / Modelowanie w VCS*) charakteryzuje środowisko obliczeniowe Visual Crash Studio (VCS) służące do przeprowadzanie obliczeń metodą makro elementów: interfejs użytkownika oraz charakterystyczne cechy metody obliczeniowej. Następnie Doktorant przedstawia napisane przez siebie w języku C# zewnętrzne oprogramowanie optymalizacyjne oraz sposób jego integracji ze środowiskiem VCS.

Rozdział 5 (*Zastosowane algorytmy optymalizacji*) charakteryzuje trzy wykorzystane w pracy numeryczne algorytmy optymalizacyjne: metodę największego spadku/wzrostu, metodę Monte Carlo oraz algorytmy ewolucyjne.

Rozdział 6 (*Przykłady numeryczne*) jest najistotniejszym rozdziałem pracy. Doktorant przedstawia w nim, analizuje i porównuje wyniki obliczeń optymalizacyjnych kolumn cienkościennych (stalowych lub aluminiowych, o przekroju kwadratowym lub sześciokątnym) oraz bardziej złożonego modelu podłużnicy silnikowej. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem metody makro elementów oraz autorskiego interfejsu optymalizacyjnego.

Rozprawę podsumowuje Rozdział 7 (*Podsumowanie*). Zawiera on wnioski Doktoranta wywiedzione na podstawie przedstawionych przykładów obliczeniowych oraz nakreśla potencjalne kierunki dalszych badań.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa poświęcona jest tematowi aktualnemu badawczo, oryginalnemu i o dużym znaczeniu aplikacyjnym. Doktorant sprawnie posługuje się klasyczną metodyką prowadzenia badań naukowych w swojej dyscyplinie, to jest 1) rozpoczyna pracę od zarysowania szerokiej problematyki i przeglądu światowej literatury naukowej oraz uwarunkowań technicznych; następnie na tym tle 2) określa problem szczegółowy; 3) analizuje potencjalnie przydatne metody modelowania analizowanego zjawiska i uzasadnia wybór jednej z nich; 4) przedstawia odpowiednie metody optymalizacyjne oraz stworzoną przez siebie ich implementację numeryczną wraz z narzędziem umożliwiającym ich integrację z zewnętrznym środowiskiem obliczeniowym; 5) prezentuje i analizuje szereg przykładów numerycznych, część z nich weryfikuje poprzez porównanie z danymi literaturowymi; 6) przedstawia wnioski i zarysowuje dalsze możliwe kierunki badań. Taki schemat badań, odzwierciedlony w strukturze rozprawy, pozytywnie świadczy o naukowej dojrzałości Doktoranta.

Za interesujące i istotnie oryginalne recenzent uznaje przede wszystkim następujące elementy rozprawy:

- Przedstawiona praca jest według wiedzy recenzenta pierwszą próbą systematycznej integracji metody makro elementów oraz algorytmów optymalizacyjnych ogólnego przeznaczenia. Dotychczasowe próby optymalizacji w zakresie optymalizacji energochłonności konstrukcji cienkościennych albo wykorzystywały modele analityczne o dużym poziomie ogólności, albo były realizowane poprzez bardzo czasochłonne obliczenia szczegółowe metodą elementów skończonych.
- Uwagę zwraca wnikliwa analiza czynników istotnych dla zadania optymalizacji, w tym średniej i maksymalnej siły zgniatania, energii właściwej, geometrycznych wymiarów optymalizowanych komponentów, oraz wpływu tych czynników na znalezione optimum.
- Przedstawione rozwiązanie ma duży potencjał aplikacyjny. Integracja programistyczna metod optymalizacyjnych z efektywną numerycznie metodą makro elementów pozwala na systematyczną, szeroko zakrojoną optymalizację struktur energochłonnych konstrukcji pojazdów już na wstępnych etapach projektowania.
- Podkreślić należy wartość obszernego przeglądu światowej literatury naukowej dotyczącej optymalizacji konstrukcji nadwozia oraz energochłonności konstrukcji cienkościennych, jak również wykorzystywanych w tym celu metod modelowania i optymalizacji.

Tematyka rozprawy dobrze uzupełnia i wpisuje się w intensywnie rozwijany obszar światowej nauki związany z zagadnieniami optymalizacji konstrukcji. Należy jednak podkreślić oryginalność zaproponowanego podejścia: klasyczne sformułowania w tym obszarze dotyczą najczęściej konstrukcji

liniowych oraz obciążeń o charakterze statycznym, rozprawa natomiast dotyczy modeli silnie nieliniowych oraz obciążeń o charakterze udarowym. Aktualność tematyki potwierdza fakt publikacji przez Doktoranta częściowych wyników rozprawy w dwóch uznanych, światowych czasopismach naukowych: *Thin-Walled Structures* (Elsevier, Q1, $IF_{2019}=4.033$, 140 pkt. MNiSW) oraz *Structural and Multidisciplinary Optimization* (Springer, Q1, $IF_{2019}=3.377$, 100 pkt. MNiSW), jak również istotna cytowalność obca tych prac.

Poza czysto naukowym aspektem pracy zwraca uwagę również jej potencjał praktyczny, rozwojowy i aplikacyjny. Docenić należy też niezbędne, czasochłonne prace programistyczne przeprowadzone przez Doktoranta, w tym autorskie implementacje wybranych algorytmów optymalizacyjnych oraz narzędzia umożliwiającego ich integrację z zewnętrznym środowiskiem obliczeniowym.

5. Pytania i uwagi dyskusyjne

Recenzent nie zauważył w rozprawie żadnych większych błędów ani zaniedbań. Poniższe uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny i w zamierzeniu mają przyczynić się do zwiększenia przejrzystości i walorów poznawczych rozprawy.

- Podobnie jak praktycznie wszystkie pokrewne prace dostępne w literaturze, rozprawa analizuje zgniatanie elementów w sposób quasi-statyczny. Prędkości są na tyle niewielkie, by większość efektów dynamicznych można było pominąć, w tym efekty inercyjne. Przykładowo: prędkość zgniatania przedstawiona na Rys. 41 wynosi 2.5 m/s, czyli 9 km/h. Czy przy rzeczywistych zderzeniach z prędkościami komunikacyjnymi efekty dynamiczne odgrywają istotną rolę? Jeśli tak, to jak można by było je uwzględnić w procesie optymalizacji i jaki byłby ich wpływ na wyniki? Czy metoda makro elementów (lub jej implementacja w środowisku VCS) umożliwia symulację tych efektów?
- Ograniczenia optymalizacyjne (siła średnia, siła maksymalna, momenty gnące itp.) są implementowane poprzez szereg modyfikacji pierwotnej funkcji celu za pomocą funkcji kary. Optimum znalezione przez algorytmy optymalizacyjne zależy od wartości odniesienia tych ograniczeń oraz od współczynników funkcji kary – dotyczy to zwłaszcza funkcji określonej zależnością (92). W jaki sposób należy ustalić wartości odniesienia i współczynniki funkcji kary? Jaki jest ich wpływ na zbieżność algorytmów optymalizacyjnych?
- W ramach pracy zostały zaimplementowane autorskie wersje trzech algorytmów optymalizacyjnych: proste przeszukiwanie losowe, algorytm genetyczny oraz metoda największego spadku/wzrostu. Wymagało to od Doktoranta znacznego nakładu pracy. W wypadku metody największego spadku/wzrostu zwracają jednak uwagę pewne uproszczenia (sztywny schemat długości kroku, brak implementacji warunków zbieżności itp.). Dlaczego Doktorant nie zdecydował się na wykorzystanie gotowych bibliotek optymalizacyjnych w wybranym języku programowania lub na integrację środowiska VCS z jednym z popularnych środowisk obliczeniowych (Matlab, Mathematica, Octave itp.)? Pozwoliłoby to zaoszczędzić czas poświęcony na własnoręczną implementację algorytmów optymalizacyjnych, a jednocześnie dałoby dostęp do ich sprawdzonych, zaawansowanych implementacji.
- Nie jest jasne, dlaczego w rozprawie zaimplementowane i testowane są trzy różne algorytmy optymalizacyjne. W prostym wypadku wyniki są porównywalne, a w wypadku problemu bardziej złożonego można się z góry spodziewać, że metoda Monte Carlo będzie mniej efektywna niż np. algorytm genetyczny.

6. Uwagi redakcyjne

Rozprawa sformułowana jest w języku polskim. Jej polszczyzna i skład są czytelne i zrozumiałe. Poniższe uwagi nie mają charakteru merytorycznego, a jedynie techniczno-redakcyjny.

- W wypadku optymalizacji kolumn cienkościennych występują jedynie dwie zmienne optymalizacyjne i przestrzeń rozwiązań łatwo jest spróbkować niezbyt dużym kosztem numerycznym. Czytelnikowi łatwiej by było nabrać intuicji dotyczącej problemu, gdyby rozprawa oprócz wykresów podstawowej funkcji celu (energii właściwej) prezentowała również wykresy funkcji ograniczeń (średnia siła zgniatania oraz maksymalna siła zgniatania).
- Funkcje celu przedstawione na Rys. 29 i 30 nie wydają się wypukłe, wbrew stwierdzeniu na str. 98.
- Lekturę i porównanie wyników utrudnia fakt, że wykresy funkcji celu są prezentowane na Rys. 29, 30, 35–39 w różny wizualnie sposób (inne ustawienie i zakresy zmienności osi, inna perspektywa, inne schematy kolorystyczne). Być może czytelniejszą formą byłyby wykresy konturowe z wyraźnie zaznaczoną dziedziną optymalizacji określoną nierównościami (65–67).
- Rys. 35: czy jednostką pionowej osi nie powinny być kJ/m? Wykres prezentuje energię zaabsorbowaną na pewnej drodze zgniatania. Jaka to droga?
- Dyskusja dotycząca generatora liczb pseudolosowych przedstawiona na str. 62–64:
 - Dyskusja wydaje się zbyt szczegółowa. Dotyczy ona tylko konkretnej implementacji języka C#, a opisany problem zdaje się wskazywać na błędną implementację generatora. Nie jest jasne, co oznacza polecenie „wstrzymaj instrukcję” (Rys. 15). Być może wystarczy przed każdym losowaniem zainicjować generator nową wartością (np. aktualnym licznikiem czasu)?
 - Liczby punktów wymienione w tekście (9000/1000/3000) nie odpowiadają liczbom punktów wymienionym w podpisie Rys. 14 (1000/3000/9000).
 - Rys. 14bc sugeruje jednostajny rozkład generowanych liczb pseudolosowych, podczas gdy tekst mówi o rozkładzie normalnym.
 - Rys. 15: wydaje się, że zamiast „N>i” powinno być „i>N”.
- Schemat przedstawiony na Rys. 20 zawiera dwie pętle. Nie jest jasne dla czytelnika, dlaczego tworzone jest k grup po nt modeli. Opis eksperymentu numerycznego na str. 82 wymienia nawet trzy pętle (10x15x20 modeli).
- Rys. 23 nie jest czytelny. Główna informacja zajmuje jedynie parę procent jego powierzchni. Wykres zaprezentowany w pozostałej części tego rysunku nie jest zrozumiały dla czytelnika.

7. Podsumowanie

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marka Krzywobłockiego dotyczy aktualnego tematu z obszaru optymalizacji konstrukcji: efektywnych numerycznie metod optymalizacji struktur energochłonnych z wykorzystaniem metody makro elementów. Rozwiązując postawione problemy badawcze Doktorant posłużył się klasyczną metodyką prowadzenia badań naukowych i wykazał się umiejętnością samodzielnego ich prowadzenia. Osiągnięte wyniki należy uznać za oryginalne i interesujące dla szerszego środowiska naukowego. Rozprawa generuje dalsze problemy badawcze oraz ma znaczny potencjał aplikacyjny, co potwierdza jej istotność. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter techniczny i nie umniejszają wartości pracy.

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami (Dz.U. 2021 poz. 478). Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy Pana mgr. inż. Marka Krzywobłockiego do publicznej obrony.

Wnioskuje również o wyróżnienie pracy. Wniosek ten uzasadniam oryginalnością tematyki podjętej przez Doktoranta, szerokim zakresem przeprowadzonych prac oraz istotnością i potencjałem badawczym i aplikacyjnym otrzymanych wyników.