

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

Warszawa, 14 stycznia 2022 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Zabojszczy
pt. „Optymalizacja jednowarstwowych przekryć stalowych”

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Prof. dr hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka, Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Świętokrzyskiej, z dnia 30 września 2021 r. i dołączona do niego rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Zabojszczy pt. „*Optymalizacja jednowarstwowych przekryć stalowych*”.

Praca powstała w Katedrze Mechaniki, Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych. Promotorem Doktoranta jest Pani dr hab. inż. Urszula Radoń, prof. PŚk a promotorem pomocniczym dr inż. Piotr Tausowski z Zakładu Informatyki i Nauk Obliczeniowych IPPT PAN.

2. Tematyka pracy

Rozprawa dotyczy obszaru optymalizacji odpornościowej słabo wyniosłych konstrukcji kratowych podatnych na globalną utratę stateczności poprzez przeskok węzła i obejmuje dwa aktualne zagadnienia optymalnego projektowania:

- I. Minimalizację ciężaru geometrycznie nieliniowych konstrukcji przestrzennych wykonanych z materiału liniowo-sprężystego i poddanych losowym obciążeniom.
- II. Ocenę poziomu bezpieczeństwa konstrukcji poprzez określenie wskaźnika niezawodności oraz prawdopodobieństwa awarii.

Oba zagadnienia są aktualne badawczo i stanowią istotny fragment żywego nurtu optymalizacji konstrukcji inżynierskich. Przedstawione zagadnienia analizowano na przykładach jednowarstwowych słabo wyniosłych prętowych przekryć stalowych. Wykazano, że utrata stateczności takich konstrukcji najczęściej związana jest ze zjawiskiem przeskoku węzła, podczas gdy nośność na wyboczenie poszczególnych prętów jest zachowana. Tematyka rozprawy ma zatem niezaniechanalny potencjał inżynierski. Podjęcie tak określonej tematyki badań należy uznać za w pełni uzasadnione.

wpłynęło dnia:

1

Data 2022 -01- 17

Podpis 

3. Zakres i treść rozprawy

Rozprawa liczy 133 strony i została napisana w języku polskim. Podzielona została na 6 rozdziałów zakończonych spisem literatury i wykazem norm oraz wymaganym Ustawą krótkim streszczeniem sformułowanym w języku polskim i angielskim. Bibliografia liczy 204 pozycje, w tym 1 pozycja współautorstwa Doktoranta, która jest indeksowana w bazie *Scopus*. Dodatkowo Doktorant opublikował 5 prac w renomowanych czasopismach z aktualnej listy czasopism MEiN (*Buildings, Materials, Applied Sciences* oraz prestiżowym polskim czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*).

W Rozdziale 1 (*Wprowadzenie*) Doktorant zwięźle charakteryzuje zakres tematyczny rozprawy, umieszcza je w szerszym kontekście problematyki optymalizacji konstrukcji i przywołuje odpowiednio najważniejsze pozycje literaturowe. Rozdział zamyka krótkie omówienie przyjętych założeń i oryginalnych osiągnięć Doktoranta oraz tezy, której poprawność dowiedziona została w rozprawie.

Rozdział 2 poświęcono modelowaniu i analizie konstrukcji stalowych, ze szczególnym uwzględnieniem jednowarstwowych przekryć prętowych. Przedstawiono podstawowe typy kopuł stalowych, takie jak kopuły Schwedlera, Lamella, żebrowe, geodezyjne, czy trójdrożne. W podrozdziale 2.2 opisano metody analizy numerycznej konstrukcji wykorzystywane do wyznaczania sił wewnętrznych. Punkt 2.3 stanowi przegląd zagadnień związanych z analizą konstrukcji przy użyciu metody elementów skończonych. Przywołano w nim również definicję skalarnego parametru sztywności oraz metody stałej długości łuku służącej do określania ścieżki równowagi. W kolejnym punkcie przedstawiono opis budowy macierzy sztywności pojedynczego elementu kratowego z uwzględnieniem związków geometrycznie nieliniowych. Rozdział zakończono przykładem ilustrującym utratę stateczności w postaci przeskoku węzła kratownicy Misesa o 3 stopniowym kącie nachylenia prętów.

W rozdziale 3 omówiono zagadnienia związane z analizą niezawodności konstrukcji inżynierskich. Kolejno w punktach 3.2 oraz 3.3 omówiono dwie najczęściej stosowane metody, tj. metodę FORM oraz metodę symulacyjną Monte Carlo. Wprowadzono definicję wskaźników niezawodności Cornella i Hasofer-Linda. Analizowano również elastyczność wskaźników niezawodności wykorzystywaną do oceny trendów procesu optymalizacji. W podrozdziale 3.4 wykazano zalety wskaźnika niezawodności Hasofer-Linda, który został wybrany do dalszych analiz. W ostatnim rozdziale przedstawiono kwestie związane z budową modeli probabilistycznych konstrukcji inżynierskich. Na dwóch przykładach obliczeniowych przedstawiono ocenę wpływu typu i parametrów rozkładu prawdopodobieństwa zmiennych losowych na wartość wskaźnika niezawodności.

Rozdział 4 jest jednym z najważniejszych rozdziałów rozprawy i poświęcony jest przeglądowi istniejących klasycznych metod optymalizacji konstrukcji jak również wprowadzeniu nowoczesnej metody optymalizacji niewrażliwej na niepewne parametry projektowe. W rozdziale tym wyróżniono dwa podejścia do optymalizacji konstrukcji: deterministyczne oraz odpornościowe. W punkcie 4.2 omówiono metody optymalizacji deterministycznej, w tym metody gradientowe, takie jak metody newtonowskie i pseudo-newtonowskie oraz metody bezgradientowe, takie jak metoda Nelder-Meada czy metoda symulowanego wyżarzania. Punkt 4.3 zawiera sformułowanie zadania optymalizacji odpornościowej (ang. *robust optimization*). Omówione zostają również zagadnienia tworzenia planu eksperymentów przy użyciu optymalnej hiperkostki facińskiej oraz metody budowy powierzchni odpowiedzi z wykorzystaniem wielomianów aproksymacyjnych i metody Krigingu.

Rozdział zakończony został przykładem numerycznym ilustrującym porównanie obu podejść optymalizacyjnych (deterministycznego i odpornościowego) dla projektu belki wspornikowej obciążonej siłą na końcu wspornika.

W rozdziale 5 zestawiono dwa przykłady analizy jednowarstwowych przekryć prętowych, porównując odpowiednio wyniki uzyskane z użyciem optymalizacji deterministycznej i odpornościowej. W obydwu przykładach przeprowadzono kolejno analizę niezawodności, optymalizację deterministyczną oraz odpornościową przekryć prętowych zauważając wyraźną poprawę niezawodności rozwiązania odpornościowego kosztem niewielkiego wzrostu ciężaru konstrukcji względem rozwiązania deterministycznego. Dodatkowo, celem przykładów było przedstawienie efektu wartości współczynnika wagowego na końcowy wynik optymalizacji.

W kończącym rozprawę Rozdziale 6 Doktorant krótko podsumowuje uzyskane wyniki badań.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa poświęcona jest analizie niezawodności i optymalizacji odpornościowej konstrukcji z uwzględnieniem ich zastosowań do projektowania jednowarstwowych przekryć prętowych. Obydwa tematy są aktualne badawczo i dobrze wpisują się w kierunek badawczy związany z nowoczesnymi metodami optymalizacji konstrukcji.

Doktorant sprawnie posługuje się metodyką prowadzenia badań naukowych w swojej dyscyplinie, to jest 1) rozpoczyna pracę od zarysowania szerokiej problematyki; 2) formułuje matematycznie i analizuje poszczególne zadania, omawia ich warianty i szczególne przypadki; 3) opracowuje numeryczne metody rozwiązania i weryfikuje je na szeregu reprezentatywnych zadań; 5) proponuje i analizuje możliwość praktycznej realizacji opracowanej metodologii; 6) omawia tło literaturowe i umiejscawia w nim swoje wyniki. Taki schemat badań, odzwierciedlony w strukturze rozprawy, potwierdza naukową dojrzałość Doktoranta.

Za interesujące i istotnie oryginalne elementy rozprawy należy uznać przede wszystkim:

- Klarowną i jednolitą systematyzację metodyki projektowania jednowarstwowych przekryć prętowych narażonych na globalną utratę stateczności poprzez przeskok węzła.
- Zastosowanie podejścia odpornościowego do minimalizacji ciężaru konstrukcji w postaci kopuł stalowych.
- Opracowanie nowego algorytmu obliczeniowego służącego do określenia współczynnika niezawodności konstrukcji. Zaproponowany algorytm zakłada wykorzystanie dwóch systemów komputerowych *Abaqus* i *Numpress Explore*. Pierwszy z nich służy do wyznaczenia ścieżki równowagi a drugi do analizy niezawodnościowej konstrukcji metodą FORM.
- Opracowanie szeregu przykładów numerycznych ilustrujących niebezpieczeństwo związane z wykorzystywaniem optymalizacji deterministycznej w projektowaniu słabo wyniosłych przekryć prętowych.
- Analizę wrażliwości otrzymanego rozwiązania optymalnego poprzez wyznaczenie elastyczności współczynnika niezawodności ze względu na zmianę wartości średniej i odchylenia standardowego.

Docenić należy również przeprowadzoną w ostatnim rozdziale pracy weryfikację numeryczną wpływu współczynnika wagowego γ na wyniki optymalizacji odpornościowej. W rozdziale tym wykazano, że im mniejszy jest ten współczynnik (tj. im większe jest znaczenie wartości średniej) tym mniejsza jest masa konstrukcji czyli konstrukcja jest bardziej optymalna w sensie deterministycznym. Zwiększenie natomiast współczynnika wagowego γ (czyli zwiększenie znaczenie odchylenia standardowego) wpływa na polepszenie odporność konstrukcji na zmienność parametrów losowych, zwiększając jednak jej masę.

Na szczególne podkreślenie zasługuje szeroki zakres przeprowadzonych badań, które obejmują trzy odległe tematy wymagające zastosowania zróżnicowanych metod analizy teoretycznej i technik numerycznych. Objętość tematyczna i struktura pracy świadczy o biegłości Doktoranta w teoretycznej i numerycznej pracy badawczej.

Rozprawa ma charakter badań podstawowych, jednakże opracowane metody odnoszą się bezpośrednio do rzeczywistych problemów projektowych i ich potencjał aplikacyjny należy ocenić jako bardzo istotny. Dotyczy to zarówno zasygnalizowanej w pracy możliwości realizacji przestrzennie zróżnicowanych zoptymalizowanych przekryć prętowych, jak i kontroli ich niezawodności i wrażliwości na niedokładności wykonania i losowe obciążenia.

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.

- W odróżnieniu od zaproponowanej w pracy definicji skalarnego parametru sztywności (wzór 2.6) w oryginalnym sformułowaniu wprowadzonym przez Bergana oprócz ilorazu form kwadratowych występuję jeszcze człon będący kwadratem ilorazu przyrostu parametru obciążenia w aktualnym kroku do przyrostu obciążenia w kroku początkowym. Dlaczego ten człon nie występuje w definicji wprowadzonej w rozprawie?
- Symetrycznie obciążona kratownica Misesa to w zasadzie układ o jednym stopniu swobody (istotne jest tylko pionowe przemieszczenie), wprowadzone w rozdziale 2 zależności bazujące na metodzie elementów skończonych pozwalają na analizę bardziej złożonym przypadków. Czytelnik zapewne będzie miał pewien niedosyt, związany z brakiem analizy stateczności bardziej realistycznej konstrukcji prętowej.
- W algorytmie na rys. 3.6 przewidziano sprzężenie pomiędzy dwoma systemami obliczeniowymi mianowicie *Abaqus* i *Numpress Explore*, natomiast w dalszej części pracy mowa jest o systemie *Robot Structural Analysis System*. Jak się ten program wpisuje w algorytm przedstawiony na rys.3.6 ? Czy to jest zamiennik programu *Abaqus*?
- Na stronie 81 (rys 4.5) przedstawiono dwa przykładowe układy hiperkostek łańciskich na płaszczyźnie. Następnie we wzorach (4.37) i (4.38) wprowadzono kryteria oceny jakości dwóch różnych układów wygenerowanych kostek. Zdaniem Recenzenta warto było poddać ocenie powyższe przykładowe układy kostek przy użyciu wprowadzonych kryteriów i poddać je dokładniejszej analizie.
- Wzory (4.44) oraz (4.45) przedstawiają przybliżenie powierzchni odpowiedzi wielomianami drugiego rzędu. Wzory te zawierają cztery człony (stały, liniowy i dwa człony kwadratowe,

z których jeden przedstawia iloczyn dwóch zmiennych o tym samym indeksie a drugi o różnych indeksach). Powstaje pytanie dlaczego takie człony nie występują we wzorze (4.43)?

- W przedstawionych przykładach obliczeniowych dotyczących optymalizacji deterministycznej z ograniczeniami Doktorant stwierdza, że obliczenia zrealizowano za pomocą metody Nelder-Meada. Tutaj należałoby chyba napisać zmodyfikowanej metody Nelder-Meada zaproponowanej zapewne przez Subrahmanyama w 1989 roku. Bazowa wersja metody Nelder-Meada jest przewidziana jedynie dla problemów optymalizacji bez ograniczeń.
- Dodatkowo w wielu przykładach Doktorant stwierdza obliczenia zrealizowano przy maksymalnej liczbie iteracji $N=1000$ oraz parametrze zbieżności $\epsilon=1e-8$. Zdaniem Recenzenta warto byłoby podać ile iteracji zostało rzeczywiście wykonanych do uzyskania wymaganej dokładności rozwiązania.
- Na stronie 99 (rys 5.4) Doktorant przedstawia naprężenie zredukowane w prętach wyznaczone wg hipotezy Huber-Misesa-Hencky'ego. Jest to nieco zaskakujące ponieważ konstrukcja została zamodelowana jako przestrzenna kratownica, w prętach której występują jedynie siły osiowe.
- Na stronie 105 (rys. 5.6) przedstawiono optymalne wartości zmiennych projektowych w zależności od wartości współczynnika wagowego dla wartości średniej. Aby uniknąć ewentualnych wątpliwości warto oznaczyć wyraźnie na osi poziomej, że jest to współczynnik wagowy, którego wartość wynosi $1-\gamma$
- Na podstawie przedstawionych w rozprawie przykładów obliczeniowych Doktorant zauważa, że zastosowanie optymalizacji odpornościowej znacząco poprawia wartość współczynnika niezawodności przy niewielkim wzroście masy konstrukcji. Oczywiście takie zdanie jest prawdziwe, powstaje jednak pytanie: czy ze względu na niejawną zależność pomiędzy parametrami używanymi w optymalizacji odpornościowej a współczynnikiem niezawodności konstrukcji nie lepiej byłoby zastosować tutaj wprost optymalizację niezawodnością zamiast optymalizacji odpornościowej?

6. Pytania i uwagi redakcyjne

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

- Ogólna uwaga do wszystkich symboli stosowanych we wzorach i tekście. Dużą poprawę czytelności rozprawa zyskałaby przez zastosowanie pochyłej czcionki do wyróżnienia symboli matematycznych. Uwaga dotyczy wszystkich rozdziałów pracy
- Zastosowano różne poziomy indeksów stycznej macierzy sztywności poniżej wzoru (2.16)
- Podano błędną rozpiętość kratownicy Misesa. Poprawna rozpiętość to $2L$ czyli 400 cm
- Zastosowano błędny opis pionowej osi na rysunku 2.16b) powinno być SPS zamiast μ
- We wzorze (3.1) mamy $g(\mathbf{x}) \leq 0$ jako obszar awarii, w dalszej części pracy natomiast (np. wzór 4.1) jest to obszar bezpieczny. Warto jest stosować spójne oznaczenia
- Zwrot „obliczenia statyczno-wytrzymałościowe” w około połowie wystąpień pisany jest z myślnikiem w pozostałych przypadkach bez myślnika. Zdaniem Recenzenta poprawny zapis powinien zawierać myślnik.

- Przedstawienie graficzne ogólnej strategii optymalizacji gradientowej przedstawione na rys. 4.2 jest mało czytelne. Warto wyraźnie oddzielić i oznaczyć kierunek optymalizacji od skalowanego długością kroku kierunku optymalizacji.
- Str. 69 nad wzorem (4.4), zdanie "*Można to wyrazić za pomocą wyrażenia*" jest nieco niefortunne, chyba lepiej brzmiało by "*Można to przedstawić za pomocą wyrażenia*"
- Str. 69 pod wzorem (4.4) w zdaniu "*Często wykorzystywanym kryterium jest także ograniczenie ilości iteracji*" zwrot ilość iteracji należy zastąpić liczbą iteracji.
- Str. 76, w drugim zdaniu pod rys.4.3 brakuje podmiotu. Powinno ono brzmieć "*Stanowi ono ważny element procesu ...*" a nie "*Stanowi ważny element procesu ...*".
- Str. 84, w ostatnim zdaniu pierwszego akapitu występuje sformułowanie "*bliskie przybliżenie w pobliżu*". Zdaniem Recenzenta to dość niefortunne sformułowanie, które należało by zastąpić innym sformułowaniem.
- Str. 91, w trzeciej linii powinno być rys. 4.7 a nie rys. 4.6.
- W podsumowaniu na stronie 95 (ostatnie zdanie drugiego akapitu) napisano, że prawdopodobieństwo awarii wykazuje niemal pewne zniszczenie, podczas gdy wartość prawdopodobieństwa wynosiła 0.499 czyli niespełna 50%. Taka wartość jest niedopuszczalna z inżynierskiego punktu widzenia, ale pewne zniszczenie to raczej niewłaściwe sformułowanie!

7. Podsumowanie

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Zabojszczy dotyczy dwóch aktualnych tematów obszaru optymalizacji konstrukcji: analizy niezawodności i optymalizacji odpornościowej. Rozwiązując postawione problemy badawcze Doktorant posłużył się 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, co potwierdza jej istotność. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter techniczny i nie umniejszają wartości pracy.

W moim przekonaniu rozprawa spełnia warunki określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy Pana mgr. inż. Pawła Zabojszczy do publicznej obrony.

