

Warszawa, dnia 03.12.2021

dr hab. inż. Tomasz Sokół
Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej
Al. Armii Ludowej 16
00-637 Warszawa

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Zabojszczy pt. „Optymalizacja jednowarstwowych przekryć stalowych”

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo prof. dr hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka, Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Świętokrzyskiej, z dnia 30 września 2021 roku, informujące mnie o powierzeniu mi funkcji recenzenta (zgodnie z uchwałą RNDILiT PŚk nr 12/2021 z dnia 9 września 2021r).

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Pawła Zabojszczy pt. „Optymalizacja jednowarstwowych przekryć stalowych” przygotowana na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Urszula Radoń, profesor Politechniki Świętokrzyskiej. Promotorem pomocniczym jest dr inż. Piotr Tazowski z Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy i ocena zasadności podjęcia tematu

Przedłożona do oceny praca wpisuje się w nurt współczesnych metod optymalizacji konstrukcji uwzględniających losowy charakter zmiennych projektowych. Przedmiotem badań są mało wyniosłe dźwigary powierzchniowe, których konstrukcje nośne realizowane są poprzez jednowarstwowe kopuły prętowe, w szczególności kratownicowe. Konstrukcje tego typu pozwalają na uzyskanie bardzo dużych rozpiętości przekryć, ale jednocześnie wymagają zaawansowanych analiz wytrzymałościowych uwzględniających nieliniowość geometryczną i badanie równowagi w rzeczywistej/odkształconej konfiguracji układu. Wynika to z faktu, że nośność takich konstrukcji determinowana jest zwykle poprzez utratę stateczności w związku z osiągnięciem punktu granicznego obciążenia a nie punktu bifurkacji, a nawet w przypadku tego drugiego, deformacja konstrukcji jest zbyt duża, aby można ją było badać wg liniowej teorii statyki i/lub stateczności.

Temat podjęty w pracy jest aktualny badawczo i ważny dla praktyki projektowej, dlatego uważam jego podjęcie za celowe.

wpłynęło dnia:

Data 2022-01-03

Podpis 

4. Zakres i treść rozprawy

Rozprawa jest napisana w języku polskim, liczy 133 stron, zawiera 56 rysunków i 41 tabel. Składa się z sześciu rozdziałów i spisu literatury, ponadto zawiera spis treści i wymagane Ustawą streszczenia w języku polskim i angielskim. Bibliografia liczy 204 pozycji literaturowych i 6 referencji do wytycznych normowych Eurokod.

W Rozdziale 1 'Wprowadzenie' Autor przedstawia i uzasadnia tematykę podjętych badań w zakresie optymalnego projektowania mało wyniosłych jednowarstwowych kopuł prętowych. Następnie przedstawia dość obszerny przegląd literatury związanej z tematyką pracy i zwięźle formułuje cele i tezę rozprawy.

Rozdział 2 dotyczy zagadnień 'Modelowania i analizy stalowych konstrukcji prętowych', w szczególności mało wyniosłych jednowarstwowych przekryć kratownicowych. Autor zwraca uwagę na konieczność uwzględnienia geometrycznie nieliniowej pracy tego typu konstrukcji do prawidłowej oceny wyężenia materiału i stanu przemieszczeń. Podaje ogólne równania metody elementów skończonych do opisu zagadnień geometrycznie nieliniowych oraz wzory definiujące tzw. styczną macierz sztywności elementu kratownicy płaskiej. W rozdziale tym omawiane są również pokrótce znane koncepcje procesu przyrostowo-iteracyjnego, w tym metoda długości łuku i skalarny parametr sztywności. Rozdział kończy poglądowy przykład tzw. kratownicy Misesa, w którym pokazano wpływ związków geometrycznie nieliniowych na stan przemieszczeń i naprężeń konstrukcji oraz jej statecznej pracy.

W trzecim rozdziale Autor przedstawia podstawy teorii niezawodności konstrukcji, w tym dwie popularne metody szacowania miar niezawodności, tj. metodę FORM i metodę Monte Carlo. Podaje też definicję wskaźnika elastyczności wykorzystywanego do oceny wrażliwości na zmianę poszczególnych zmiennych losowych, co wspomaga budowę modelu stochastycznego. W kolejnych punktach tego rozdziału Autor omawia wskaźnik niezawodności Hasofer-Linda i – na podstawie dwóch przykładów – bada wpływ parametrów i typu rozkładu prawdopodobieństwa zmiennych losowych na wartość tego wskaźnika.

Rozdział czwarty zawiera wprowadzenie do optymalizacji konstrukcji w ujęciu deterministycznym i stochastycznym, gdzie losowy charakter zmiennych decyzyjnych uwzględniany jest w podejściu tzw. 'robust optimization' nazywanym w pracy optymalizacją odpornościową. Pokrótce omówione są wybrane metody optymalizacyjne i sposób przeformułowania zadania optymalizacji deterministycznej do zadania optymalizacji odpornościowej. Rozdział kończy poglądowy przykład optymalizacji belki wspornikowej.

W kolejnym, piątym rozdziale pracy Autor przedstawia dwa rozbudowane przykłady optymalizacji jednowarstwowych przekryć kratownicowych i analizuje wpływ losowego charakteru zmiennych decyzyjnych na rozwiązanie optymalne i na wartość wskaźnika niezawodności. Autor porównuje wyniki optymalizacji deterministycznej i odpornościowej w różnych wariantach, co pozwala mu na sformułowanie wniosków końcowych, zawartych w ostatnim, szóstym rozdziale pracy.

5. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa poświęcona jest dość trudnej dziedzinie dotyczącej optymalnego projektowania konstrukcji, dziedzinie która wciąż jest na etapie badań. Jednym z trudniejszych zadań jest uwzględnienie losowości pewnych parametrów projektowych i zbadanie ich wpływu na rozwiązania optymalne. W pracy podjęto udaną próbę rozwiązania tego problemu poprzez zastosowanie tzw. optymalizacji odpornościowej. W tym kontekście tytuł pracy jest trochę zbyt ogólnikowy, gdyż nie w pełni odzwierciedla jej treść - mógłby lepiej precyzować zakres badań, który w zasadzie dotyczy mało wyniosłych jednowarstwowych przekryć kratownicowych i ich optymalizację w ujęciu odpornościowym.

Podział na rozdziały jest logiczny i spójny. Autor trafnie dobiera wykaz literatury związanej z tematem pracy i dokonuje obszernego jej przeglądu w oddzielnym punkcie 'Wprowadzenia'. Na uwagę zasługuje też klarowne podanie celów pracy i postawienie głównej tezy: '*Zastosowanie metod projektowania określonego mianem „optymalizacji odpornościowej” (ang. Robust Optimization), w znaczący sposób zwiększa bezpieczeństwo projektowanej konstrukcji*'. Teza ta nie jest zbyt odkrywczą, gdyż inspiracją do powstania metod optymalizacji odpornościowej były właśnie zauważone niedostatki rozwiązań uzyskanych metodami optymalizacji deterministycznej. Teza została jednak klarownie postawiona i poparta wynikami przedstawionymi w dalszej części pracy.

Na uwagę i za jedno z ważniejszych osiągnięć rozprawy uważam umiejętne połączenie geometrycznie nieliniowej analizy konstrukcji z teorią niezawodności i optymalizacją odpornościową. Tym samym Doktorant wykazał się dużą znajomością różnych metod numerycznych i ich umiejętnym wykorzystaniem. Co do proponowanej w pracy metodologii postępowania mam pewne zastrzeżenia i uwagi, które przedstawię poniżej. To jednak w żaden sposób nie zmienia faktu, że przedłożona do oceny rozprawa stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe i poszerza naszą wiedzę w zakresie optymalnego projektowania konstrukcji.

Uwagi dyskusyjne i pytania

- Na stronie 18 w akapicie 2 Autor pisze: 'W przypadku powłoki jednowarstwowej istnieje możliwość modelowania połączeń przegubowych, jednak wymagane jest dokładne zbadanie stateczności globalnej (zjawiska przeskoku), częstotliwości drgań własnych oraz odporności na skręcanie powłoki siatkowej', a ostatecznie bada tylko pierwszy efekt, tzn. stateczność globalną – wypadałoby to w pracy odpowiednio skomentować.
- Rozdział drugi zawiera dość ogólnikowy opis wymiarowania wg Eurokodu. Autor nie podaje żadnych wzorów, zakładając prawdopodobnie, że są one powszechnie znane. Jednak dla kompletności wywodu wzory te warto byłoby podać. Poczuję pewien niedosyt po ukończeniu czytania tego rozdziału, gdyż mógłby on wnieść więcej istotnych informacji związanych z wymiarowaniem elementów prętowych.
- Str. 29, ostatnie zdanie 'Parametr SPS jest dodatni dla statecznych stanów równowagi, ujemny zaś dla stanów niestatecznych' nie jest prawdziwe. Wiemy jedynie, że jeśli SPS jest ujemny to na pewno mamy stan równowagi niestatecznej, ale to że SPS jest dodatni nie musi oznaczać statecznej równowagi. Tak istotnie jest w przypadku pierwotnej statecznej gałęzi ścieżki równowagi, o czym jednak Autor zapomniał wspomnieć i zastosował pewien skrót myślowy.

- Str. 37: Autor uzasadnia pominięcie sprawdzania naprężeń następująco: '... Zbliżone zachowanie można zaobserwować w przypadku jednowarstwowych słabo wyniosłych przekrój prętowych. Dla takich konstrukcji warunki naprężeniowe poszczególnych prętów nie odgrywają istotnej roli w ocenie nośności, a tym samym bezpieczeństwa konstrukcji. Decydujące znaczenie mają ograniczenia przemieszczeniowe związane z możliwością przeskoku węzła. Dlatego też w dalszej analizie, a zwłaszcza w realizacji przykładów 5.1, 5.2 w rozdziale 5, zdecydowano się pominąć sprawdzanie naprężeń w poszczególnych prętach, natomiast skupiono się na badaniu wpływu przemieszczeń na bezpieczną pracę konstrukcji.' Zgadzam się z jego argumentacją, ale tylko w takim kontekście, że sprawdzanie naprężeń można pominąć na etapie optymalizacji, tzn. możemy pominąć ograniczenia naprężeniowe w zadaniu optymalizacji. Jednak po jego rozwiązaniu powinno się sprawdzić, czy rzeczywiście w konstrukcji optymalnej naprężenia są po stronie bezpiecznej.
- W rozdziale 3 omawiane są różne metody i wskaźniki niezawodności ale w sposób zbyt ogólnikowy. Niektóre nowe pojęcia są podawane bez ich precyzyjnej definicji, dotyczy to w szczególności wskaźnika niezawodności Hasofera-Linda, który przecież w pracy jest potem często wykorzystywany. Tematyka jest ciekawa, ważna i warto byłoby ją omówić nieco bardziej szczegółowo, nawet na elementarnym poziomie. Na przykład nie wyjaśniono jaką rolę w projektowaniu odgrywać może wskaźnik niezawodności Hasofera-Linda i jakie powinien przyjmować wartości, aby można było uznać konstrukcję za bezpieczną. Ponadto w rozdziale tym wprowadzono pojęcie 'elastyczności wskaźnika niezawodności' a w dalszych częściach pracy stosowano pojęcie 'wskaźniki elastyczności' co jest pewną niekonsekwencją, która utrudnia zrozumienie przekazu. Dopiero dwa ciekawe przykłady obliczeniowe zrealizowane pod koniec tego rozdziału wyjaśniają wiele wątpliwości powstających wcześniej, np. rolę wskaźników elastyczności, które odgrywają przecież ważną rolę w tworzeniu probabilistycznego modelu. Poruszenie tej tematyki w pracy uważam za bardzo celowe, ale jej opis mógłby być nieco bardziej klarowny.
- Str. 61: Autor pisze 'W przykładzie (przypadku drugim) do opisu obciążenia śniegiem oraz obciążenia wiatrem zastosowano rozkład Gumbela. Moduł sprężystości i pole przekroju opisano za pomocą rozkładu logarytmiczno-normalnego.' W tekście nie wyjaśniono, dlaczego akurat takie a nie inne rozkłady przyjęto. *Skąd to wynika?*
- Str. 91: Autor pisze 'Optymalizację deterministyczną, zrealizowano za pomocą sympleksowej metody Neldera Meada przy maksymalnej ilości iteracji $N = 1000$ oraz parametrze zbieżności $\epsilon = 1.0E-08$.' Wybór tej metody jest zaskakujący, gdyż w porównaniu do metod gradientowych jest ona bardzo kosztowna. *Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.*
- Str. 92: Autor pisze 'Analiza wpływu, jaki na modelowane zjawisko ma losowy charakter opisujących je parametrów pozwala projektować konstrukcje optymalne i zarazem odporne na fluktuacje wartości parametrów. Te możliwości daje nam optymalizacja odpornościowa.' To prawda, optymalizacja odpornościowa w jawny sposób uwzględnia losowy charakter zmiennych decyzyjnych. Jednak czuje się pewien niedosyt, dlatego w pracy nie podjęto też próby uwzględnienia bezpośrednio w zadaniu optymalizacji ograniczenia na współczynnik niezawodności, co zapewniłoby uzyskanie konstrukcji o żądanej niezawodności. Ponadto to co Autor nazywa optymalizacją deterministyczną

wpisuje się bardziej w nurt tzw. *optymalizacji naiwnej*, gdzie uzyskujemy konstrukcje o pełnym wytężeniu (materiału lub deformacji) i jest oczywiste, że tego typu rozwiązania nie mają żadnego zapasu bezpieczeństwa i dają też zerowy współczynnik niezawodności. W tradycyjnym projektowaniu do takich sytuacji nie dochodzi ze względu na stosowanie normowych współczynników bezpieczeństwa, szczególnie w odniesieniu do obciążeń stałych i zmiennych. Dlatego też przykład belki wspornikowej analizowanej w rozdziale 4 nie można uznać za miarodajne i sprawiedliwe porównanie podejścia deterministycznego i odpornościowego. Ponadto niezrozumiałe jest, że do tak trywialnego zadania optymalizacji, które można rozwiązać w sposób ścisły na kartce Autor wykorzystuje bardzo kosztowną metodę Nelder-Meada, o czym wspominałem już wcześniej.

- W przykładach w rozdziale piątym Autor podaje na początku wartości obciążenia krytycznego uzyskane analizą wyboczeniową wg tzw. stateczności początkowej co w rozpatrywanej klasie konstrukcji nie ma uzasadnienia, gdyż błąd szacowania wartości obciążenia krytycznego może być zawyżony nawet o kilkadziesiąt %. Ten fakt nie został odpowiednio skomentowany w pracy, ale rozumiem ze intencją Autora było właśnie pokazanie konieczności prowadzenia analizy geometrycznie nieliniowej. *Czy dobrze odczytuję intencję Autora?*
- Szkoda, że np. na rys. 5.2 i 5.8 pokazano deformację konstrukcji z analizy liniowej a nie przedstawiono postaci wyboczeniowej wyliczonej ze stateczności początkowej ani też deformacji konstrukcji z analizy nieliniowej tuż po przekroczeniu obciążenia krytycznego, co pozwoliłoby na lepsze zrozumienie nieliniowego zachowania badanych konstrukcji.
- Na str. 99 Autor pisze, że 'zweryfikowano naprężenia w prętach wg hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego' nie wspominając o tym, że w stanie jednoosiowego stanu naprężeń są one tożsame z wartościami bezwzględnymi naprężeń osiowych. Ponadto naprężenia te są jednorodne na całym przekroju poprzecznym, dlatego rys. 5.5 i 5.11 nie wnoszą żadnych istotnych informacji, tym bardziej że ich jakość nie jest najlepsza.
- Pewną wątpliwość budzi fakt, że do wstępnej analizy konstrukcji Autor stosuje program Robot Structural Analysis, skoro potem w optymalizacji odpornościowej wykorzystywany jest program Numpress Explore współpracujący z Abaqusem. To nie jest konsekwentne podejście, gdyż wyniki nieliniowej analizy z Abaqusa i Robota mogą się różnić, *dlaczego więc jedno z kluczowych ograniczeń (dot. przemieszczeń) jest generowane programem Robot a potem wykorzystywane w optymalizacji w zestawie Numpress Explore/Abaqus?*
- Przy pierwszym czytaniu tekstu pewne zdziwienie wzbudziło ostatnie zdanie na str. 100 'Dlatego też w dalszej analizie zdecydowano się pominąć sprawdzanie naprężeń w poszczególnych prętach, natomiast skupiono się na badaniu wpływu przemieszczeń na bezpieczną pracę konstrukcji', gdyż analizując wyniki w tab. 5.4 widzimy, że w przemieszczeniach mamy dużo więcej zapasu niż w naprężeniach. Sprawa wyjaśnia się dopiero dalej gdy Autor w zadaniu optymalizacyjnym w jawny sposób ogranicza wartości dopuszczalnych przemieszczeń wg przemieszczenia krytycznego.
- Na str. 102 Autor arbitralnie przyjmuje 'zmienności na poziomie 5% dla pól powierzchni oraz 1% dla wysokości poszczególnych węzłów', nie tłumacząc dlaczego (przy okazji wkradł się tu błąd stylistyczny bo nie chodzi o pola powierzchni tylko o pola przekrojów poprzecznych). Wydaje się, że odchylenia pól przekrojów poprzecznych katalogowych

kształtowników stalowych powinny być mniejsze niż 5%. W tym kontekście pewne wątpliwości budzą też sztucznie narzucone ograniczenia na przekroje podane w tab. 5.8 gdyż ostatecznie one właśnie determinują rozwiązanie optymalne. Podobny problem pojawia się w kolejnym przykładzie co widać po porównaniu danych w tab. 5.26 i 5.27.

- W przykładach z rozdziału piątego Autor arbitralnie przyjmuje jako kluczowe ograniczenie w zadaniu optymalizacji wartość przemieszczenia krytycznego uzyskanego jednak dla pewnej wstępnej konstrukcji. Gdybyśmy wzięli pod uwagę jedynie stateczność globalną i proporcjonalnie zmieniali przekroje prętów to wtedy obciążenie krytyczne będzie odpowiednio przeskalowane a przemieszczenie krytyczne pozostanie bez zmian. Natomiast w procesie optymalizacji różne przekroje mogą się zmieniać w różny sposób, co nieuchronnie prowadzi do redystrybucji sztywności poszczególnych części konstrukcji i tym samym zmiany wartości przemieszczenia krytycznego. W pracy zabrakło stosownego komentarza na ten temat. Szkoda też, że przykłady z rozdziału piątego są dość podobne, gdyż trudniej jest wysnuć na ich podstawie jakieś bardziej ogólne wnioski.
- Podsumowanie jest zbyt skromne w stosunku do przeprowadzonych w pracy badań. Autor nie wskazuje jasno jaki jest jego wkład w rozpatrywaną w pracy tematykę, czy proponowana metodologia definiowania i rozwiązywania zadań optymalizacji odpornościowej jest, i w jakim stopniu, jego oryginalnym pomysłem, a na ile jest to powielenie dotychczasowych idei. Nie wskazuje też kierunków dalszych badań, co należy uznać za pewien niedostatek pracy. Na przykład w tradycyjnym projektowaniu konstrukcje poddawane są wielowariantowemu obciążeniu i dopiero ich uwzględnienie prowadzi do dostatecznie niezawodnych/bezpiecznych rozwiązań. Taki kierunek przyszłych badań wydaje się naturalny, szkoda tylko że nie został on wskazany w podsumowaniu.

6. Uwagi redakcyjne i edytorskie

Praca jest napisana klarownie i poprawną polszczyzną. Zawiera pewne usterki redakcyjne, które nie mają charakteru merytorycznego i nie obniżają ogólnej oceny pracy. Zauważone usterki w tekście podaję poniżej.

- W pierwszym zdaniu we wprowadzeniu, jak również w kilku innych miejscach pracy Autor stosuje pojęcie 'słabo wyniosłych konstrukcji' zamiast 'mało wyniosłych konstrukcji'.
- Str. 5, akapit 3 p.1.1: Zamiast 'Optymalne metody poszukiwania' powinno być 'Metody optymalizacji'
- Str. 10, akapit 3: 'Artykuł obejmuje zagadnienia obejmujące' – błąd stylistyczny
- Str. 11, akapit 3: 'Należy jednak cały czas pamiętać' – trochę zbyt potocznie 'cały czas'
- Str. 14, akapit 4: 'możliwe są duże gradienty przemieszczeń węzłów konstrukcji' – słowo 'gradienty' użyte nieprawidłowo i wprowadza niepotrzebne zamieszanie
- Str. 14, przedostatni akapit: zamiast 'W ostatnim rozdziale' powinno być 'W ostatnim podrozdziale'
- Str. 17, akapit po Rys.2.2: 'Umiejętność takich kombinacji, ... jest niezwykle istotnym narzędziem' – zbyt duży skrót myślowy, gdyż umiejętność nie może być narzędziem
- Str. 22, akapit 1: 'modelem w projektowania' powinno brzmieć 'modelem w projektowaniu'

- Str. 35, na początku p.2.5: zamiast '... kratownicę von Misesa o rozpiętości $L = 200 \text{ cm}$ ' powinno być 'kratownicę von Misesa o rozpiętości $2L = 400 \text{ cm}$ '
- Str. 36, akapit po rys. 2.15: 'powszechnie wykorzystywanego wzoru Eulera $P = \dots$ ' – po pierwsze mamy tu konflikt oznaczeń, gdyż 'P' było dosłownie kilka linii wcześniej używane w innym kontekście, a po drugie nie wiem dlaczego liczba π jest w tym wzorze pisana wielką literą Π .
- Str. 42: 'kryteria Kuhna-Tuckera' powinny brzmieć 'kryteria Karusha-Kuhna-Tuckera' zgodnie z obecnymi trendami w literaturze po 2000 roku.
- Wzór (3.12) jest zapisany niezgodnie z powszechnie stosowaną konwencją, że wektory lub macierze oznaczamy pogrubioną czcionką, ale ich poszczególne elementy już nie, bo są skalarami
- Str. 42, wzór w tekście poniżej (3.13): $\frac{\nabla G(\mathbf{z}^{(k)})}{\|\nabla G(\mathbf{z}^{(k)})\|}$ ma niepotrzebnie wstawiony symbol gradientu w liczniku przed 'G'
- Str. 58: 'Dla zwiększenia dokładności obliczeń wszystkie elementy zostały dodatkowo podzielone na 10 części' – jest to niezręczne sformułowanie, gdyż chodzi tu o podział każdego pręta na 10 elementów skończonych, a nie elementu na 10 części
- Str. 64, akapit 1: 'wpływ zmiennych losowych na jest analogiczny' – zbędne 'na'
- Str. 67: 'Funkcja celu f musi być różniczkowalna i określona w całej przestrzeni' – niekoniecznie, wystarczy że jest klasy $C1$ w obszarze dopuszczalnym
- Str. 67: 'Po wykonaniu przesunięcia z dostatecznie małym dodatnim współczynnikiem' powinno brzmieć 'Po wykonaniu przesunięcia z dostatecznie małym krokiem w odpowiednim kierunku'
- Str. 67: 'Należy pamiętać, że gradient jest kierunkiem stycznym do linii największego spadku (lub wzrostu) funkcji i pokrywa się z tą funkcją tylko w przypadku funkcji liniowej.' – zbyt duży skrót myślowy bo jak rozumieć że 'gradient pokrywa się z funkcją'? poza tym gradient nie jest kierunkiem tylko go wskazuje
- Str. 71, równanie (4.10): $\mathbf{V}^{(i+1)} = \mathbf{V}^{(i)} + (1 + \mathbf{C}^{(i)}) \mathbf{A}^{(i)} + \mathbf{D}^{(i)}$, nie wiadomo jak interpretować skalarną 'jedynekę' w dodawaniu do macierzy – tu powinno być po prostu **I** aby wskazać, że chodzi o macierz jednostkową
- Str. 76, pod rys. 4.3: 'w której dąży się do ograniczeniu kosztów' powinno brzmieć 'w której dąży się do ograniczenia kosztów'
- Str. 84, równanie (4.42): 'gdzie: B_i , $i=0,1,\dots, n$ – wymiar powierzchni stanu granicznego' – brak opisu wyjaśniającego co oznacza B_i ?
- Str. 65/86: wiele odwołań do numerów równań w rozdziale 4 jest nieprawidłowa, co prawdopodobnie wynika z przenumerowania równań po wstawieniu kilku nowych
- Str. 86, ostatni akapit: 'Podejście to zakłada, że, że wektor' – nadmiarowe 'że'
- Str. 87: 'lokalnego minima funkcji' powinno być 'lokalnego minimum funkcji'
- Str. 87, przedostatni akapit: 'sympleksu Nedlera-Meed'a' – nazwiska napisane błędnie
- Str. 90-91, r. (4.66) i (4.67): nierówności ostre ' $<$ ' i ' $>$ ' powinny być zapisane jako nieostre ' $\leq$ ' i ' $\geq$ ' gdyż zbiór rozwiązań dopuszczalnych musi być zbiorem domkniętym
- Str. 92, w ostatniej linii pojawiają się stałe normalizujące η^* i σ^* jednak nie podano jakie wartości przyjęto w analizowanym przykładzie

- Str. 94: 'Po przeprowadzonej iteracyjnej analizie optymalizacji robust' - niezręczne sformułowanie 'iteracyjna analiza optymalizacji' zamiast po prostu 'optymalizacja'
- Str. 98: wykresy przedstawione na rys. 5.3 są dość słabej jakości, ponadto budzą pewne wątpliwości, gdyż ścieżka równowagi pokazana jest w zakresie do 20.26 mm podczas gdy skalarny parametr sztywności w zakresie do 18.41 mm – brak jakiegokolwiek komentarza na ten temat w tekście
- Str. 102, r. (5.3): ograniczenie powinno być zapisane jako nierówność nieostra ' $\leq$ '
- Str. 104: błędnie zapisane pierwsze ograniczenie w p. 3. Zamiast ' $\geq$ ' powinno być ' $\leq$ '
- Str. 106: 'Im większa waga wartości średniej tym konstrukcja bardziej optymalna' – słowo 'optymalna' ma dość ścisłe znaczenie i nie powinno się pisać, że coś jest mniej lub bardziej optymalne. I dalej 'Gdy zaś dajemy coraz większe wagi odchylenia standardowego polepszamy odporność konstrukcji na zmienność parametrów losowych, zmniejszając jednocześnie optymalność' – nie tyle zmniejszamy optymalność, co wartość funkcji celu gdyż zmieniają się ograniczenia
- Str. 107: 'Funkcję celu stanowić będzie masa konstrukcji' podczas gdy we wzorze (5.5) podano masę tylko tej optymalizowanej części konstrukcji
- Str. 107: 'przy maksymalnej ilość iteracji' zamiast 'przy maksymalnej ilości iteracji', a jeszcze lepiej i poprawniej 'przy maksymalnej liczbie iteracji'
- Str. 108: błędnie zapisane pierwsze ograniczenie w p. 3. Zamiast ' $\geq$ ' powinno być ' $\leq$ '
- Str. 111: brak danych jak pogrupowano przekroje prętów i jakie przyjęto ich wartości przed przedstawieniem wyników analizy liniowej w tab. 5.19 i 5.20, bo przecież podane wartości zależą od tych danych wejściowych – ta uwaga dotyczy też poprzedniego przykładu omawianego w p. 5.1
- Str. 112: 'W drugim kroku ~~konstrukcja~~ przeprowadzono liniową analizę wyboczeniową' – niepotrzebne słowo 'konstrukcja'
- Str. 115, w p. 5.2.1: konflikt oznaczeń gdyż w pierwszym zdaniu Autor pisze o obciążeniu siłą $P=5\text{kN}$, zaraz w kolejnym zdaniu używa tego samego symbolu 'P' do oznaczenia 'pola powierzchni południków' – tu mamy konflikt oznaczeń ale i często powtarzany w pracy błąd polegający na tym, że zamiast pisać o 'polu przekroju poprzecznego pręta' Autor błędnie używa pojęcie 'powierzchnia' lub 'pole powierzchni'
- Str. 117, r. (5.9): podobnie jak wcześniej błędnie podane ograniczenie w postaci nierówności ostrej
- Str. 117, p. 5.2.3: w punkcie 3 formułowanego zadania optymalizacji ponownie źle podano znak nierówności w ograniczeniu na dopuszczalne przemieszczenie (z uwzględnieniem jego losowego charakteru)
- Str. 118: źle napisana nazwa używanego programu 'NumressExplore' zamiast 'NumpressExplore'
- Str. 118, akapit przed tab. 5.28: cały akapit jest napisany dość enigmatycznie, szczególnie jego ostatnie zdanie: 'Dla dobrze zamodelowanego zadania wartości z optymalnego punktu i walidacji są lepiej zoptymalizowane niż dla wyniki najlepszego punktu' – pomijając literówkę 'wyniki' zamiast 'wyniku' lub 'wyników' – nie wiadomo co Autor miał na myśli.

- Str. 120, w podsumowaniu: 'W konstrukcjach tego typu mogą pojawić się duże gradienty przemieszczeń' – niepotrzebne i wprowadzające w błąd słowo 'gradienty'
- Str. 120: 'otrzymujemy konstrukcję mniej optymalną' – podobny problem wystąpił wcześniej na str. 106. Wg mnie nie powinno się pisać że coś jest mniej lub bardziej optymalne, zamiast gorsze czy lepsze
- Na koniec jeszcze drobna uwaga edytorska: niektóre rysunki i tabele mogłyby być lepiej sformatowane, co poprawiłoby przejrzystość pracy. Chodzi mi głównie o formatowanie tabel dla których przewidziano zbyt małe odstępy przed i po. Powoduje to, że tekst zbyt blisko się zlewa z tabelami.

7. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska rozwiązuje oryginalny problem naukowy jakim jest uwzględnienie losowych zaburzeń w zadaniu optymalizacji mało wyniosłych przekręć kratownicowych z zastosowaniem tzw. optymalizacji odpornościowej. Praca ma znaczenie zarówno poznawcze jak i praktyczne i podejmuje aktualną tematykę.

Praca obejmuje różne dziedziny wiedzy a Doktorant wykazał się dobrą znajomością i umiejętnym ich połączeniem, co pozwoliło na osiągnięcie wyznaczonego celu naukowego i udowodnienie postawionych tez. Doktorant wykazał się również dużymi umiejętnościami w prowadzeniu zaawansowanych analiz i optymalizacji konstrukcji. Zrealizował dość obszerny zakres badań, otrzymał oryginalne wyniki i na ich podstawie sformułował poprawne wnioski. Świadczy to o dobrym przygotowaniu i predyspozycjach Doktoranta do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych. Zawarte w ocenie uwagi mają charakter raczej dyskusyjny i nie umniejszają wartości pracy.

Uważam, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi wartościowe osiągnięcie naukowe w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Lądowa i Transport.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, zawarte w Ustawie z dnia 14.03.2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz Rozporządzeniu Ministra i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22.09.2011 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (wraz z późniejszymi zmianami)”. Wniosuję o dopuszczenie rozprawy Pana mgr inż. Pawła Zabojszczy do publicznej obrony.

T. Sokół

dr hab. inż. Tomasz Sokół