Michał Jan Guminiak, dr hab. inż., prof. PP
Instytut Analizy Konstrukcji
Politechniki Poznańskiej
ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznan
tel.: 61 665 24 75
e-mail: michal.guminiak@put.poznan.pl

Poznań, 15.05.2023 r.

Recenzja dysertacji doktorskiej pt.

Dynamic structural reliability index estimation of steel skeletal and cable structures

autorstwa mgr. inż. Rafała Bredowa

przygotowanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Marcina Kamińskiego

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja dysertacji doktorskiej zatytułowanej *Dynamic structural reliability index estimation of steel skeletal and cable structures* (tytuł w języku polskim brzmi: *Ocena wskaźnika niezawodności dynamicznej konstrukcji stalowych konstrukcji szkieletowych i linowych*), której autorem jest mgr inż. Rafał Bredow, została opracowana na podstawie pisma z dnia 28.04.2023 roku, wystosowanego przez Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej prof. dr. hab. inż. Dariusza Gawina zgodnie z Uchwałą Rady ds. Stopni Naukowych z dnia 28.04.2023 roku. Promotorem dysertacji doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Marcin Kamiński, kierownik Zakładu Niezawodności Konstrukcji Katedry Mechaniki Konstrukcji Politechniki Łódzkiej.

2. Opis dysertacji

Dysertacja przygotowana w języku angielskim liczy 165 stron i składa się ze streszczenia w językach angielskim wraz ze słowami kluczowymi, siedmiu rozdziałów, spisu literatury oraz załączników. Dysertacja zawiera rysunki, których numeracja przyporządkowana jest numerom kolejnych rozdziałów. Na początku niniejszej pracy, jej Autor wyraził podziękowanie promotorowi, prof. dr. hab. inż. Marcinowi Kamińskiemu za wszelką pomoc merytoryczną i opiekę naukową podczas pracy nad prezentowaną tematyką.

Zasadniczym celem pracy jest opracowanie dokładnej i efektywnej metody dynamicznej oceny wskaźników niezawodności wybranych konstrukcji inżynierskich. Rozważania naukowe Doktoranta koncentrują się na analizie dynamiki smukłych konstrukcjach stalowych, podatnych na dynamiczne oddziaływania otoczenia. Możliwość efektywnego projektowania złożonych lekkich konstrukcji

stalowych w połączeniu z minimalizacją kosztów wytworzenia takiej konstrukcji prowadzi do globalnej – optymalnej redukcji jej masy, co Autor podkreślił na początku niniejszej dysertacji.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił ogólny zarys rozważanego problemu oraz motywację do podjęcia badań.

Rozdział drugi zawiera główną tezę niniejszej dysertacji oraz elementy z nią związane, których realizacja prowadzi do osiągnięcia wyznaczonego celu badawczego.

W rozdziale trzecim Autor nakreślił przegląd literatury poświęconej historii rozwoju teorii miar niezawodności konstrukcji.

W rozdziale czwartym Autor przedstawił podstawy matematyczne rozważanych zagadnień.

Rozdział piąty zawiera szczegółowy opis eksperymentów numerycznych. Podrozdziały odnoszą się odpowiednio do stalowego masztu z odciągami, stalowej hali ze zwężającymi się ramami głównymi i stalowej wieży szkieletowej.

Rozdział szósty przedstawia otrzymane wyniki eksperymentów numerycznych. Podrozdziały zachowują tę samą kolejność, co opis eksperymentów numerycznych, tzn. przestawiają analizy stalowego odciągu masztu, hali stalowej ze zwężającymi się ramami głównymi oraz stalowej wieży szkieletowej.

Dysertację zamyka rozdział siódmy, który stanowi podsumowanie uzyskanych wyników wraz z omówieniem możliwości poszerzenia zaprezentowanych badań. Opisano w nim propozycje dotyczące monitorowania bezpieczeństwa konstrukcji, także z implementacją innych koncepcji szacowania jej niezawodności.

W pracy Autor wskazał instytucje, które sfinansowały wykonane badania – grantu badawczego OPUS nr. 2021/41/B/ST8/02432 pt. „Entropia probabilistyczna w obliczeniach inżynierskich" i sponsorowany przez Narodowe Centrum Nauki.

3. Uwagi krytyczne o dysertacji

3.1. Uwagi formalne

Dysertacja ma budowę kanoniczną i jest napisana w sposób staranny. Autor, posługując się bardzo zaawansowanym słownictwem anglojęzycznym, przedstawił trudne zagadnienia stochastycznego ujęcia nieliniowej dynamiki konstrukcji smukłych konstrukcji stalowych.

Dysertacja zawiera wstęp, a kolejne jej rozdziały tworzą zwarty ciąg rozważań naukowych. Na zakończenie Doktorant sformułował wnioski oraz propozycje dalszych badań. Całość wieńczy spis literatury wraz z odpowiednimi załącznikami, w których opisano procedury numeryczne związane z losowym ujęciem analizowanych zagadnień.

3.2. Uwagi merytoryczne

Podstawową tezą niniejszej dysertacji jest stwierdzenie, że iteracyjna technika perturbacji stochastycznej może być z powodzeniem stosowana w dynamicznej ocenie wskaźnika niezawodności

stalowych konstrukcji szkieletowych oraz stalowych konstrukcji z odciągami linowymi. Autor zdefiniował następujące główne cele swoich dociekań naukowych. Są to:

1. Ustalenie najbardziej niekorzystnej kombinacji obciążeń dla każdej ze zmiennych stanu w postaci stanu granicznego nośności i stanu granicznego użytkowalności metodą deterministyczną. Cel ten rozpatrywany jest odrębnie dla każdej konstrukcji opisanej eksperymentem numerycznym biorącej i opiera się na od deterministycznych wartości parametrów projektowych, które później zostaną uznane za zmienne losowe.
2. Zainicjowanie analizy dynamicznej Stochastycznej Metody Elementów Skończonych (SFEM) dla 11 realizacji wybranych niepewnych parametrów wejściowych dla każdej rozpatrywanej zmiennej stanu. Cel ten realizowany jest dla każdej konstrukcji i każdego eksperymentu numerycznego.
3. Tworzenie plików wejściowych, zawierających dyskretne zbiory danych reakcji konstrukcji w postaci naprężeń lub sił wewnętrznych oraz przemieszczeń, które następnie zostaną zaimportowane do systemu algebry losowej.
4. Import i weryfikacja uzyskanych dyskretnych zbiorów danych odpowiedzi konstrukcji do samodzielnie napisanego algorytmu, który przybliża owe funkcje metodą funkcji odpowiedzi oraz sprawdzenie, czy krok czasowy eksportu zbioru danych pozwala na wykonanie optymalnej aproksymacji.
5. Po wyznaczeniu kroku czasowego odtwarzania zbioru danych, analiza dynamiczna SFEM dla danego eksperymentu numerycznego jest powtarzana dla innych źródeł niepewności projektowych. Wszystkie rozważane wyjścia zmiennych losowych przechodzą weryfikację ich przydatności do aproksymacji funkcji odpowiedzi konstrukcji (ang. Structural Response Functions (SRF)).
6. Budowa algorytmów numerycznych, które umożliwiają obliczanie w sposób dynamiczny zbiorów charakterystyk losowych na podstawie utworzonych wcześniej SRF z wykorzystaniem podejścia półanalitycznego.
7. Budowa algorytmów numerycznych, które umożliwiają obliczanie w sposób dynamiczny zbiorów charakterystyk losowych na podstawie utworzonych wcześniej SRF z wykorzystaniem symulacji Monte-Carlo ze sterowaną liczbą próbkowania.
8. Budowa algorytmów numerycznych, które umożliwiają obliczanie w sposób dynamiczny zbiorów charakterystyk losowych na podstawie utworzonych wcześniej SRF z wykorzystaniem iteracyjnej techniki perturbacji stochastycznej.
9. Analiza zgodności dynamicznych wyników losowych uzyskanych za pomocą iteracyjnej metody perturbacji stochastycznej oraz metod: półanalitycznej i Monte-Carlo.

10. Analiza wpływu aproksymacji rzędu wielomianów dopasowania funkcji odpowiedzi na otrzymane charakterystyki probabilistyczne techniką iteracyjnych zaburzeń stochastycznych oraz technikami referencyjnymi – półanalityczną i Monte-Carlo.
11. Analiza porównawcza wpływu kolejności aproksymacji wielomianów dopasowania na otrzymane charakterystyki losowe.
12. Implementacja iteracyjnej techniki perturbacji stochastycznej oraz metod referencyjnych – półanalitycznej i Monte-Carlo do dynamicznej oceny wskaźnika niezawodności.
13. Analiza porównawcza otrzymanych dynamicznych wskaźników niezawodności metodami: iteracyjnej perturbacji stochastycznej, półanalityczną oraz Monte-Carlo.
14. Analiza porównawcza dynamicznych wskaźników niezawodności uzyskanych dla różnych wejściowych źródeł niepewności.

W ramach tematu zaprezentowanego w niniejszej dysertacji Autor zbadał trzy modele konstrukcji: maszt z odciągami stalowymi, halę stalową ze zwężającymi się ramami głównymi oraz stalową wieżę szkieletową. Szczegółowe opisy tych konstrukcji z uwzględnieniem ich właściwości geometrycznych, przekrojów, zastosowanych obciążeń oraz wprowadzonych losowych parametrów projektowych zawarto w rozdziale 5 niniejszej dysertacji.

Obliczenia MES przeprowadzono z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej, tak aby stan równowagi w każdym kroku czasowym analizy dynamicznej był uzyskiwany nie tylko iteracyjnie względem zbieżności całkowania równań ruchu, ale również przyrostowo narastającego obciążenia.

Symulacje metodą stochastycznych elementów skończonych dla stalowego masztu z odciągami przeprowadzono w programie „AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS", a dla hali stalowej i wieży szkieletowej w środowisku zaawansowanych analiz numerycznych w ujęciu metody elementów skończonych – „ABAQUS".

Autor niniejszej dysertacji przyjął niepewność parametrów projektowych (losowych) zgodnie z rozkładem Gaussa przy czym metoda funkcji odpowiedzi znajduje zastosowanie do budowy ciągłych funkcji odpowiedzi mających zastosowanie w analizie losowej, w dziedzinie wejściowych parametrów projektowych. Dyskretne wielkości odpowiedzi konstrukcji z symulacji SFEM podlegają dalszemu przybliżeniu w postaci wielomianu metodą ważonych najmniejszych kwadratów (WLSM).

Badane charakterystyki losowe obejmują wartości oczekiwane odpowiedzi analizowanej konstrukcji i ich wyjściowy współczynnik zmienności, ponieważ oba te czynniki ostatecznie prowadzą do oceny wskaźnika niezawodności konstrukcji, który odnosi się do tzw. koncepcji niezawodności Cornella (wzory (4.55) i (4.56)) oraz Hasofera-Linda (wzory (4.57), (4.58) i (4.59)) zawartych w wytycznych projektowych. Pierwsza koncepcja miary niezawodności konstrukcji bazuje na założeniu, że mimo nieliniowości funkcja wydajności, można tę funkcję przedstawić za pomocą szeregu Taylora, który zawiera element liniowy, rozszerzony w otoczeniu wartości oczekiwanych zmiennych losowych. Druga

koncepcja miary niezawodności (Hasofera-Linda) stanowi pewną modyfikację pierwszej (Cornella) i charakteryzuje się niezmiennością w stosunku do funkcji wydajności.

Doktorant przygotował autorskie procedury numeryczne dla metody funkcji odpowiedzi wraz z analizą losową w środowisku algebry symbolicznej „MAPLE" oraz przeprowadził obliczenia mające na celu oszacowanie wartości wskaźników niezawodności dla wybranych lekkich konstrukcji stalowych.

W podsumowaniu Doktorant sformułował m. in. następujące stwierdzenia:

- Wartości oczekiwane wyjściowych losowych odpowiedzi strukturalnych odzyskane techniką perturbacji stochastycznych w jej iteracyjnej postaci zachowały doskonałą dokładność w porównaniu z technikami referencyjnymi. Jest to szczególnie cenne ze względu na znacznie większą wydajność obliczeniową metody, którą zaobserwowano w toku badań. Naturalnie, odpowiedzi wielomianowe wyższego rzędu wykazują większą czułość na funkcje odpowiedzi i ich dokładność na dyskretne wartości odpowiedzi, co przyczynia się do wzrostu rozbieżności między techniką perturbacji stochastycznych a techniką referencyjną. Do oceny dynamicznego wskaźnika niezawodności wystarczy uzyskać tylko dwa pierwsze losowe momenty centralne dla których technika perturbacji stochastycznej wykazuje dostateczną dokładność z inżynierskiego punktu widzenia.
- Różne wejściowe parametry niepewności z tym samym wejściowym rozproszeniem losowym prowadzą do różnych wyjściowych rozproszeń losowych odpowiedzi konstrukcji. To w naturalny sposób wpływa na same wskaźniki niezawodności i podkreśla, że poziom niepewności dla różnych parametrów projektowych ma największe znaczenie. Wszystkie badane konstrukcje wykazały znaczny brak wrażliwości na przypadkowe, równomiernie rozłożone obciążenia termiczne działające na konstrukcję w porównaniu z innymi obciążeniami: wiatrem lub śniegiem.
- Dodatkowo dla wieży szkieletowej oraz dla hali stalowej grubości ścianek profili okazały się również bardzo ważnym parametrem konstrukcyjnym (w największym stopniu wpłynęły na to wskaźniki niezawodności i dla tego parametru są najniższe), co tylko świadczy o postępie korozji proces w konstrukcjach stalowych jest jednym z najważniejszych czynników degradacji, który wpływa na ogólne bezpieczeństwo konstrukcji.
- Przygotowany algorytm i metodologia wykazują dużą wydajność obliczeniową, ponieważ dynamiczna ocena niezawodności oparta na iteracyjnej technice perturbacji stochastycznej pozwala na określenie dyskretnych wskaźników dla wszystkich wskazanych punktów czasowych w czasie obliczeniowym znacznie krótszym niż 10 minut. Autor podkreślił, że taki algorytm może być dalej rozwijany w ramach ciągłej oceny niezawodności konstrukcji przy rzeczywistym monitorowaniu konstrukcji.
- Dodatkowo, dla wieży szkieletowej oraz hali stalowej grubości ścianek profili stalowych okazały się również bardzo ważnym parametrem konstrukcyjnym – w największym stopniu wpłynęły na

wartości wskaźników niezawodności, które są najniższe dla tego parametru), co świadczy np. o tym, że proces korozji w konstrukcjach stalowych jest jednym z najważniejszych czynników degradacji, który wpływa na ogólne bezpieczeństwo konstrukcji.

- Zastosowanie szacowania wskaźnika niezawodności zgodnie z koncepcji Cornella wymaga, aby rozpatrywana funkcja wydajności była zgodna z rozkładem Gaussa.

Metody losowe, które bazują na rozkładach normalnych prawdopodobieństwa, cechują się względną prostotą obliczeń. Autor w sposób czytelny umieścił własne badania na tle aktualnej wiedzy związanej z metodami probabilistycznymi stosowanymi w mechanice materiałów i konstrukcji.

Ujęcie probabilistyczne (losowe) zadania z zakresu mechaniki materiałów i konstrukcji można uzyskać, rozważając skończony zbiór rozwiązań (zadań) deterministycznych. Odpowiedź konstrukcji lub elementu konstrukcji może mieć charakter deterministycznego i skończonego zbioru, który zawiera np. wartości przemieszczenia, odkształcenia, naprężenia lub sił wewnętrznych w obserwowanym punkcie konstrukcji określone dla analizy statycznej lub np. wartości charakterystyk dynamicznych w postaci częstości kołowych drgań własnych i współczynników tłumienia w analizie dynamicznej, jak również wartości krytycznego obciążenia w analizie stateczności. W dalszej kolejności bardzo istotnym elementem analizy probabilistycznej jest określenie krzywych (funkcji) dopasowania dla wejściowych danych dyskretnych. Doktorant w swojej dysertacji przeprowadził szereg eksperymentów numerycznych tak aby stworzyć zbiory danych dyskretnych, a następnie zdefiniował krzywe dopasowania, opisując je wielomianami wyższego stopnia (np. siódmego, ósmego oraz dziewiątego stopnia). Tak przygotowane dane pozwoliły na uruchomienie procedur rachunku probabilistycznego, w znaczniej mierze autorskich, za pomocą których zostały oszacowane miary bezpieczeństwa analizowanych konstrukcji, przy czym na uwagę zasługuje fakt, że miary te obliczane są w sposób dynamiczny, dla zbiorów danych dyskretnych rzeczywistych odpowiedzi konstrukcji mogą z powodzeniem znaleźć zastosowanie w monitorowaniu aktualnego jej stanu. Doktorant w toku analiz wskazał również najważniejsze, tzn. najbardziej wrażliwe parametry projektowe (wymienione powyżej).

Doktorant zdefiniował miary prawdopodobieństwa dla obserwowanych odpowiedzi konstrukcji w postaci momentów losowych, a bazując na nich zaproponował miary jej niezawodności.

Doktorant w prezentowanej dysertacji nie ograniczył się do prostych przykładów i przedstawił dużą liczbę przykładów liczbowych, które również w sposób ilościowy pozwalają ocenić zaprezentowaną tematykę dociekań naukowych.

Procedury numeryczne przedstawione w niniejszej dysertacji mają charakter autorski, co zwiększa poziom oryginalności podjętego tematu.

Wnioski końcowe sformułowane są w sposób czytelny, choć zawierają spostrzeżenia związane wyłącznie z przeprowadzonymi wcześniej symulacjami losowymi, co jest elementem wiodącym całej dysertacji.

W ocenie recenzenta zabrakło kilku komentarzy związanych z podejściem deterministycznym w numerycznym ujęciu metody elementów skończonych, koniecznym do późniejszych analiz losowych.

W spisie pozycji literaturowych brakuje jednej ważnej publikacji – jest nią rozprawa doktorska autorstwa dr. inż. Rafała Stockiego, przygotowana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Michała Kleibera poświęcona niezawodności i optymalizacji konstrukcji prętowych poddanych dużym deformacjom i zatytułowana „Niezawodnościowa optymalizacja konstrukcji prętowych w zakresie dużych przemieszczeń – teoria i program komputerowy" (IPPT-PAN, 1999 r.).

Elementami, na które warto zwrócić uwagę, są przede wszystkim autorskie, aplikacyjne algorytmy obliczeniowe ujęcia losowego z uwzględnieniem dynamicznej relacji, która zachodzi między funkcją odpowiedzi konstrukcji, a wskaźnikiem jej niezawodności, co pozwala na przeprowadzenie analiz losowych dla bieżącego stanu konstrukcji.

3.3. Główne elementy oryginalne przedstawione w dysertacji

W niniejszej dysertacji można wyróżnić następujące główne oryginalne elementy zaproponowane przez Autora:

- Główna teza przygotowanej dysertacji związana z dynamiczną oceną wskaźnika niezawodności konstrukcji.
- Zastosowanie metody funkcji odpowiedzi w dynamicznym określaniu miar niezawodności konstrukcji.
- Umiejętne wykorzystanie komercyjnego pakietu obliczeniowego metody elementów skończonych „AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS".
- Oryginalne procedury numeryczne przygotowane w ramach środowiska „ABAQUS", umożliwiające kreatywne wykorzystanie możliwości obliczeniowych tego bardzo zaawansowanego pakietu obliczeniowego metody elementów skończonych.
- Oryginalne algorytmy obliczeniowe, przygotowane w środowisku programowania symbolicznego „MAPLE".

3.4. Uwagi, sugestie i pytania

Na zakończenie można sformułować elementy na które, zdaniem recenzenta, warto zwrócić uwagę oraz poprosić Autora niniejszej dysertacji o komentarz.

1. Wskazanie przesłanek jakimi kierował się Autor przy wyborze niniejszego tematu dociekań naukowych.
2. Konstrukcje z odciągami linowymi charakteryzują się koniecznością uwzględniania w obliczeniach nieliniowych związków geometrycznych. Nawet proste z pozoru obliczenia statyczne dla cięgien z uwzględnieniem ich ciężaru własnego zmuszają projektanta do uruchomienia procedur numerycznych z liczbą iteracji, która w szczególnych przypadkach może być bardzo duża. Powoduje to znaczne wydłużenie czas obliczeń. Prosiłbym aby Doktorant

w krótko odpowiedział w jaki sposób poradził sobie z rozwiązaniem tego problemu. Czy Doktorant wykorzystywał wewnętrzne procedury pakietów „ROBOT" i „ABAQUS", czy też zaproponował własne?

3. Czy Doktorant w przeprowadzanych analizach dynamiki masztu uwzględnił zjawisko porywów wiatru, lub dodatkowe obciążenia – śniegiem lub lodem?
4. Prosiłbym o krótkie skomentowane przez Doktoranta kryteriów które zastosował w celu przyjęcia odpowiedniego stopnia wielomianów dopasowania.
5. Niedoszacowanie lub przeszacowanie stopnia wielomianu krzywych odpowiedzi prowadzi do błędnych wyników analizy losowej. Prosiłbym o krótki komentarz w jaki sposób Doktorant wybierał stopień wielomianu dopasowania, i czy były to zawsze pełne wielomiany, tzn. czy wszystkie wyrazy (współczynniki) wielomianu łącznie z wyrazem wolnym były różne od zera.
6. Metoda Monte-Carlo bazuje na tzw. prawie wielkich liczb i charakteryzuje się koniecznością wykonania bardzo dużej liczby prób, przy czym i tutaj należy wstępnie przyjąć rozkład prawdopodobieństwa cechujący daną zmienną losową. Pytanie skierowane do Doktoranta jest następujące: przy jakiej minimalnej liczbie prób można uzyskać satysfakcjonujące, tzn. miarodajne wyniki? Prosiłbym o krótki komentarz.
7. Analizy deterministyczne zostały przeprowadzone przy zastosowaniu metody elementów skończonych (MES). Prosiłbym o krótki komentarz, jaki rodzaj elementu skończonego został zastosowany do poszczególnych analiz MES.
8. Czy Doktorant uwzględnił zjawisko skręcania prętów w deterministycznych analizach numerycznych wieży stalowej? Prosiłbym o krótki komentarz.
9. W jaki sposób Doktorant modelował połączenia prętów analizowanych konstrukcji stalowych, np. wieży stalowej? Czy Doktorant przyjął całkowicie sztywne połączenia w węzłach? Prosiłbym o krótki komentarz.
10. Globalne oszacowania czasu koniecznego do przeprowadzenia obliczeń numerycznych analizowanych konstrukcji, w szczególności konstrukcji w których nieliniowości geometryczne silnie wpływają na wyniki (wyniki w ujęciu deterministycznym). Ile całkowitego czasu procesu iteracyjnego uzyskiwania zbieżności dla spełnienia chwilowych równań równowagi przypada na całkowity czas obliczeń, tzn. czas potrzebny na oszacowanie wartości wskaźnika niezawodności konstrukcji.
11. Doktorant zastosował dwie miary oceny niezawodności konstrukcji: Cornella oraz Hasofera-Linda. Którą z nich Doktoranta stosowałby jako miarę uniwersalną? Która z nich nadaje się lepiej do prognozowana ewentualnych uszkodzeń (osłabień) zaprezentowanych konstrukcji. Prosiłbym o krótki komentarz.
12. Czy Doktorant rozważał inne niż klasyczny rozkład Gaussa rozkłady zmiennych losowych? Jakie inne rozkłady prawdopodobieństwa byłyby odpowiednie do obliczeń związanych z losową mechaniką konstrukcji inżynierskich, a w szczególności lekkich konstrukcji stalowych?

4. Wnioski końcowe i podsumowanie

Tematyka naukowa podjęta przez mgr. inż. Rafała Bredowa, której rezultatem jest niniejsza dysertacja, stanowi aktualny, bardzo ciekawy i nowy element gałęzi mechaniki związanej ze stochastycznym opisem zachowania materiałów i konstrukcji.

Zakres przedstawionych analiz jest bardzo szeroki, a Doktorant wykazał się bardzo dużą samodzielnością, na którą składają się: postawienie głównej tezy dysertacji, przygotowanie procedur numerycznych w środowiskach „ROBOT", „ABAQUS" oraz „MAPLE".

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że wyniki dociekań naukowych Doktoranta mogą znaleźć zastosowanie w rzeczywistych procedurach projektowych.

Poniżej przedstawiono wskaźniki bibliometryczne Doktoranta:

- Baza Scholar Google: indeks Hirscha H = 3 oraz 12 cytowań, gdzie rozpoznano 8 publikacji, których współautorem jest Doktorant. Najczęściej cytowanymi publikacjami są dwie prace:
  1) R. Bredow, M. Kamiński, Structural safety of the steel hall under dynamic excitation using the relative probabilistic entropy concept, Materials, 15(10), 2022, 3887-1 – 3587-11,
  2) R. Bredow, M. Kamiński, Computer analysis of dynamic reliability of some concrete beam structure exhibiting random damping, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 26(1), 2021, 45–64.
- Baza Scopus: index Hirscha H = 2 oraz 3 cytowania (bez autocytowań), gdzie rozpoznano 5 publikacji, których współautorem jest Doktorant.
- Baza Research Gate: index Hirscha H = 3, bez autocytowań dla 7 opublikowanych pozycji, których współautorem jest Doktorant.

W spisie cytowanej literatury zabrakło pozycji wspomnianej przez recenzenta (*R. Stocki, Niezawodnościowa optymalizacja konstrukcji prętowych w zakresie dużych przemieszczeń – teoria i program komputerowy, IPPT-PAN, 1999*). Warto tę pozycję zacytować w przyszłych publikacjach.

Temat rozważań naukowych podjęty przez Autora jest aktualny oraz może znaleźć zastosowanie w praktycznych analizach inżynierskich związanych ze skomplikowanym procesem projektowania lekkich konstrukcji stalowych.

Stwierdzam również, że cel dysertacji został przez jej Autora w pełni osiągnięty, a sformułowane tezy udowodnione, oraz że wkład Autora niniejszej dysertacji w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Lądowa i Transport w obszarze stochastycznej nieliniowej mechaniki konstrukcji jest widoczny.

Uwagi krytyczne i pytania zawarte w niniejszej opinii mają charakter dociekań naukowych i nie obniżają rzeczywistej wartości naukowej przedstawionej dysertacji.

Recenzent sugeruje, aby Autor niniejszej dysertacji przedstawił swoje oryginalne badania naukowe w formie książkowej nakładem Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej lub innego wydawnictwa naukowo-technicznego.

GŁÓWNY WNIOSEK KOŃCOWY

Przedstawione w dysertacji zagadnienia w pełni wyczerpują wszystkie kryteria stanowiące podstawę do ubiegania się przez mgr. inż. Rafała Bredowa o stopień naukowy doktora nauk technicznych w myśl Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.).

Wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport o przyjęcie niniejszej dysertacji doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

WNIOSEK DODATKOWY

Biorąc pod uwagę bardzo wysoki poziom naukowy przedstawionych zagadnień oraz dużą aktywność publikacyjną **wnioskuję o wyróżnienie niniejszej dysertacji doktorskiej**.

Michał Gumniak