

Szczecin, 10.07.2023

Dr hab. inż. Maciej Taczała, prof. ZUT  
Katedra Mechaniki Konstrukcji  
Wydział Techniki Morskiej i Transportu  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Bredowa

pt. „Wyznaczanie dynamicznego wskaźnika niezawodności stalowych konstrukcji  
szkieletowych i ciągnowych”

“Dynamic structural reliability index estimation of steel skeletal and cable structures”

Napisanej pod kierunkiem promotora: prof. dr. hab. inż. Marcina Kamińskiego

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę opracowania recenzji stanowiło pismo dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, z dnia z' dnia 28.04.2023 r. sporządzone zgodnie z uchwałą Rady ds. Stopni Naukowych PŁ w dyscyplinach inżynieria lądowa, geodezja i transport, architektura i urbanistyka z dnia 28.04.2023 r.

### 2. Opis rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy 165 stron. Obejmuje streszczenie, spis treści, siedem rozdziałów, bibliografię, i cztery dodatki (załączniki), w których przedstawiono algorytmy (programy) wykorzystane podczas wykonywania obliczeń.

W rozdziale 1. przedstawiono opis rozważanego problemu, motywację do podjęcia badań oraz omówiono współczesne trendy w projektowaniu konstrukcji inżynierskich w powiązaniu z cechami konstrukcyjnymi konstrukcji stalowych. Autor wskazuje swój obszar zainteresowania w odniesieniu do niezawodności konstrukcji.



W rozdziale 2 sformułowano tezę pracy, która mówi, że iteracyjną metodę perturbacji stochastycznej (Iterative Stochastic Perturbation Technique) można zastosować do oceny wskaźnika niezawodności dynamicznej stalowych konstrukcji szkieletowych oraz cięgnowych. Potwierdzenie tezy wskazano jako główny cel pracy oraz wymieniono 14 celów, których osiągnięcie uznano za niezbędne do osiągnięcia cel zasadniczego.

W rozdziale 3. dokonano przeglądu literatury dotyczącej metod analizy niezawodności; wprowadzenia wskaźników niezawodności oraz bardziej zaawansowanych metod takich jak metoda Monte-Carlo, metoda perturbacji stochastycznych (Stochastic Perturbation Technique), metoda powierzchni odpowiedzi (Response Surface Method). Zwięźle przedstawiono metody numeryczne: metodę różnic skończonych (Finite Difference Method), metodę elementów skończonych (Finite Element Method) oraz jej odmianę stochastyczną Stochastic Finite Element Method, metodę objętości skończonych (Finite Volume Method), a także metodę elementów brzegowych (Boundary Element Method). Przedstawiono również metody całkowania równań ruchu.

W rozdziale 4. przedstawiono zależności matematyczne wykorzystane w przeprowadzonych analizach w odniesieniu do części deterministycznej (równanie ruchu, związki konstytutywne, zależności pomiędzy przemieszczeniem a odkształceniem, warunki brzegowe i początkowe, postać całkową, wynikającą z zasady prac przygotowanych i jej rozwiązanie poprzez aproksymację MES i sposób całkowania równania ruchu w czasie) oraz stochastycznej (wskaźniki niezawodności Cornella, Hasofer-Linda, iteracyjna metoda perturbacji stochastycznych, metoda półanalityczna i symulacja Monte-Carlo). Przetawiono także macierze sztywności oraz mas belkowego elementu skończonego.

W rozdziale 5. opisano wykonane eksperymenty numeryczne: stalowy maszt z odciągami, stalową halę ze zwięzającymi się ramami głównymi oraz stalową wieżę szkieletową. Przedstawiono własności geometryczne i mechaniczne konstrukcji, modele obliczeniowe MES, przyłożone obciążenia dynamiczne. Wymieniono zmienne dla stanów granicznych nośności (Ultimate Limit State) i użyteczności (Serviceability LS). Opisane są również analizowane źródła niepewności dla każdego z eksperymentów numerycznych – parametry mechaniczne i środowiskowe.

Wyniki eksperymentów numerycznych otrzymane dla poszczególnych modeli obliczeniowych zestawiono w rozdziale 6. w formie probabilistycznej oraz pokazano widma dynamiczne estymowanych wskaźników niezawodności. Oceniono także wpływ aproksymacji wielomianowej na otrzymane charakterystyki probabilistyczne

W rozdziale 7. omówiono możliwości rozszerzenia badań i propozycje dotyczące monitorowania bezpieczeństwa konstrukcji.

Dodatki (załączniki) A.1 – A.4 przedstawiają algorytmy (programy) wykorzystane podczas wykonywania obliczeń.

### **3. Ocena rozprawy**

Oceniana rozprawa stanowi spójne opracowanie dotyczące analizy niezawodności konstrukcji stalowych trzech różnych typów: stalowego masztu z odciągami, stalowej hali ze zwiężającymi się ramami głównymi oraz stalowej wieży szkieletowej poddanych obciążeniom dynamicznym. Problem podjęty w rozprawie jest istotny z punktu widzenia oceny bezpieczeństwa konstrukcji tego typu oraz oceny

Do zasadniczych osiągnięć przedstawionej rozprawy zaliczyć należy:

- Stworzenie algorytmu numerycznego, pozwalającego obliczyć charakterystyki probabilistycznych w zakresie dynamiki z wykorzystaniem trzech metod: podejścia półanalitycznego, metody Monte-Carlo oraz iteracyjnej metody perturbacji stochastycznej.
- Określenie wskaźników niezawodności dynamicznej na podstawie wyników uzyskanych metodą iteracyjnej metody perturbacji stochastycznej oraz metodą Monte Carlo dla analizowanych problemów.
- Przeprowadzenie analizy porównawczej wskaźników niezawodności dynamicznej dla różnych poziomów niepewności zmiennych wejściowych.

Głównym celem rozprawy było stwierdzenie, czy iteracyjną metodę perturbacji stochastycznej (Iterative Stochastic Perturbation Technique) można zastosować do oceny wskaźnika niezawodności dynamicznej stalowych konstrukcji szkieletowych oraz ciągnowych. Dla osiągnięcia tego celu Autor postawił sobie 14 celów pośrednich, różnej wagi i obszerności. Cele te uporządkowały wywód i ułatwiły śledzenie rozprawy.

### **4. Uwagi i spostrzeżenia:**

#### **4.1. Uwagi zasadnicze**

1. Jak Autor ocenia perspektywę praktycznego wykorzystania opracowanej metody?
2. Autor stwierdza, że obliczenia wykonywane są w zakresie nieliniowym (“Solution for subsequent time steps is achieved by full Newton solver”, “Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno algorithm is used in Robot system for non-linear problems with stiffness matrix update”). Sformułowanie problemu zawiera co prawda człony nieliniowe (równanie 4.5), ale wyprowadzenie równań nie dotyczy zakresu nieliniowego, w szczególności macierze

sztwywności (równania 4.17, 4.19) są liniowe, nie są zależne od przemieszczeń i naprężeń, zatem nie może zachodzić „stiffness matrix update”.

3. W równaniach 4.4, 4.5 ew. 4.6, 4.7 nie są wystarczające do opisu spaczenia przekroju. W tym miejscu uwaga bardziej ogólna: równania 4.3 – 4.7 przydatne są do opisu ciała stałego (3D), natomiast w pracy, wbrew stwierdzeniu „Numerical experiments within the scope of this work concern solid mechanics problem”, zastosowano elementy belkowe.
4. Nie podano również teorii belek, na której oparto analizy, z tym że z równań 4.17 i 4.18 widać, że jest to teoria Eulera-Bernoulliego.
5. Z wartości wskaźnika niezawodności (recommended index=3,80) przywołanych w kilku miejscach (steel hall, steel skeletal tower) należy wnosić, że Autor odnosi się do wartości podanej w tabeli C2 Eurocode 0, limit state: ultimate, target reliability index: 50 years. Czy wskaźnik podany tam odnosi się do obliczeń statycznych czy dynamicznych jak w rozprawie?
6. W innych miejscach Autor nie podaje uzyskanego wskaźnika niezawodności, ani dla ULS, ani SLS. Na wykresach, choć trudno czytelnych, można dostrzec, że wskaźniki te mają małe wartości (z pewnością poniżej 3,80), co skutkuje dużym prawdopodobieństwem zniszczenia. W jaki sposób można to objaśnić?

#### 4.2. Uwagi redakcyjne

1. Równanie 4.3: powinno być  $ds_{ji}/dx_j$
2. Równanie 4.6: powinno być  $s_{ji} \times n_j = t_i$
3. r. 4.12 – jeżeli „u” ma być wektorem, „N” nie jest wektorem, lecz macierzą, natomiast „a” jest wektorem przemieszczeń węzłowych (nodal displacement vector), a nie “prescribed nodal degrees of freedom”
4. r 4.13 & 4.14 –wektory “a” oraz a (z podwójną kropką) powinny być napisane używając czcionki prostej pogrubionej (nie kursywy), zgodnie z pozostałym oznaczeniami.
5. Czy pojęcia “reduced stress” i „effective stress” są używane zamiennie? Jeżeli nie, to jaka jest między nimi różnica?
6. Przywołana dokumentacja [N1] nie dotyczy ABAQUSa.
7. Autor, konsekwentnie stosuje termin „beam elements”, jednak na stronie 39 pojawia się „bar elements”.
8. Zalecić można Autorowi nieco ostrożniejsze korzystanie ze źródeł pozanaukowych, zwłaszcza takich, których pochodzenie wynika z tłumaczenia, zapewne automatycznego, „torsion of Saint-Coming” zamiast „torsion of Saint-Venant”, s. 5/26 dokumentu cytowanego w rozprawie jako [N1].

9. Nie podano rodzaju elementów skończonych dla „Steel skeletal tower”
10. Na szeregu wykresach brak jest jednostek dla osi pionowej.
11. Nie podano wartości dopuszczalnych naprężeń (ULS) i przemieszczeń poziomych (SLS).
12. W szeregu przypadkach nie podano uzyskanych wartości wskaźnika niezawodności, a wyniki przedstawiono jedynie w postaci wykresów.
13. Brakuje stwierdzenia z jakim skręcaniem (spaczeniem) mamy do czynienia: swobodnym czy skrępowanym.

Uwagi mają charakter dyskusyjny, a wskazane uchybienia nie podważają wartości całości rozprawy.

## 5. Podsumowanie

Recenzowana rozprawa ma charakter teoretyczno-aplikacyjny ze znacznym udziałem analizy numerycznej. Niezależnie od kilku błędów redakcyjnych praca została napisana starannie, a wyniki przedstawione w sposób jasny i zrozumiały, a komentowane w sposób obszerny.

Rozprawa dowodzi umiejętności Doktoranta wykonywania nieliniowych obliczeń wytrzymałościowych przy wykorzystaniu programów komercyjnych w zakresie statyki i dynamiki budowli oraz wyciągania wniosków z przeprowadzonych analiz. Rozprawa wzbogaca wiedzę w zakresie zachowania się konstrukcji analizowanego typu.

Uważam, że rozprawa doktorska pt. „Wyznaczanie dynamicznego wskaźnika niezawodności stalowych konstrukcji szkieletowych i ciągnowych” autorstwa mgr. inż. Rafała Bredowa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. 2023 poz. 742) i stanowi może stanowić podstawę o ubieganie się przez niego o stopień naukowy doktora w dyscyplinie *inżynieria lądowa, geodezja i transport*, wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Marek Tarsa