

prof. Zbigniew ZEMBATY,

[z.zembaty@po.opole.pl](mailto:z.zembaty@po.opole.pl),

[url.: www.z.zembaty.po.opole.pl](http://www.z.zembaty.po.opole.pl)

Politechnika Opolska

Ul. Prószkowska 76

45-758 Opole

Opole, 7 lipca, 2023

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała BREDOW:

*Dynamic structural reliability index estimation of steel skeletal and cable structures*

### 1. PODSTAWA RECENZJI

Recenzję opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska pismem z dnia 28 kwietnia 2023 (pismo razem z rozprawą wpłynęło na Politechnikę Opolską w dniu 4 maja 2023).

### 2. CHARAKTERYSTYKA PRACY I JEJ TREŚĆ

Przedstawiona do oceny rozprawa liczy 165 stron i obejmuje siedem rozdziałów, cztery załączniki oraz spis 153 pozycji literatury, a także czterech, odrębnie opisanych literaturowych źródeł internetowych.

Rozprawa dotyczy obliczania niezawodności trzech wybranych rodzajów konstrukcji stalowej przy założeniu, że kilka z parametrów konstrukcji i obciążenia są wielkościami losowymi: moduł Younga stali, niedokładności geometryczne, dodane masy, temperatura, obciążenie wiatrem, obciążenie śniegiem. Łączne rozpatrywanie kilku z tych parametrów jako losowych i ich wpływ na niezawodnościowy opis odpowiedzi konstrukcji jest trudnym i niebanalnym problemem, którego rozpatrywania podjął się doktorant w recenzowanej rozprawie. Praca zawiera wprowadzenie do tematyki stochastycznej statyki konstrukcji ze szczególnym uwzględnieniem metod perturbacyjnych których iteracyjna i semi-analityczna wersja są wykorzystywane jako podstawowe narzędzia badawcze rozprawy. Jako podstawę do opisu zjawisk losowych występujących w mechanice badanych konstrukcji wykorzystano podejście przedstawione w Eurokodzie 0.

Następnie przedstawione są trzy przykłady: masztu z odcciągami, hali przemysłowej oraz wolno stojącej stalowej konstrukcji wieżowej rozwiązywane iteracyjną metodą perturbacyjną z rozwinięciami zp. wielomianów 10-stopnia, semi-analityczną metodą perturbacyjną oraz metodą Monte Carlo. W badaniach wykorzystano programy MES *Robot* oraz *Abaqus* których

pośrednie wyniki były eksportowane do programu *Maple* celem przeprowadzenia złożonych analiz stochastycznych.

Na zakończenie rozprawy wyciągnięte są szczegółowe wnioski.

### 3. UWAGI OGÓLNE

Analiza niezawodności konstrukcji budowlanej traktowanej jako prawdopodobieństwo jej bezawaryjnej pracy w okresie założonego czasu użytkowania jest zagadnieniem bardzo złożonym i w praktyce niemożliwym do wiarygodnego rozwiązania. Trudna lub wręcz niemożliwa jest także niezależna weryfikacja wyników nadań niezawodności konstrukcji budowlanych. W związku z tym metody dotyczące analiz niezawodności układów przemysłowych (np. elektronicznych) które z powodzeniem stosowane były od połowy XX wieku w masowej produkcji tylko z dużą trudnością przechodziły do inżynierii lądowej. Od początku lat 80-tych i w latach 90-tych w związku z rozwojem komputerów osobistych pojawiło się wiele wyników prac i kilka monografii promujących metodologię obliczania niezawodności, a także specjalnych indeksów niezawodności w analizie konstrukcji budowlanych i inżynierskich. Pojawiło się także specjalistyczne oprogramowanie do obliczania niezawodności konstrukcji, takie jak np. STRUREL (<http://www.strurel.de/>). Szybko jednak okazało się, że w zastosowaniach praktycznych inżynierii lądowej bardzo trudno jest stosować metody niezawodnościowe. Stochastyczne modelowanie niezawodności konstrukcji stało się więc bardziej narzędziem badań i kalibracji norm projektowania lub w zastosowaniu do prostych masowo produkowanych elementów, np. prefabrykatów, gdzie w połączeniu z podejściem optymalizacyjnym przynosi określone korzyści. Jednocześnie pojęcie niezawodności dotyczy raczej analiz prawdopodobieństwa przekraczania stanów granicznych nośności lub użytkowania i nie jest zatem niezawodnością konstrukcji obiektu traktowanego jako całość.

Uznać zatem można, że podjęcie w recenzowanej rozprawie rozwiązywania praktycznych zagadnień związanych analizą konkretnych złożonych konstrukcji budowlanych przy zastosowaniu zaawansowanego aparatu matematyczno-numerycznego za znaczące wyzwanie związane z tematyką analiz niezawodności w inżynierii lądowej. Należy przy tym zauważyć, że zastosowana metodologia umożliwia prowadzenie badań w zakresie nieliniowej pracy konstrukcji co w szczególności zrealizowano w odniesieniu do maszty z odciągami. Jest to duże wyzwanie, gdyż powszechnie znaną sprawą jest fakt, że metody stochastyczne mają na ogół poważne trudności w nieliniowych zagadnieniach mechaniki konstrukcji ze względu na fakt, iż silna nieliniowość często manifestuje się w analizach zachowania konstrukcji w sposób podobny do znaczących efektów losowych lub chaotycznych.

#### 4. ANALIZA ZAŁOŻEŃ DO OBLICZEŃ I WYNIKÓW BADAŃ

W rozprawie analizowane są trzy specyficzne konstrukcje budowlane,

- (a) stalowy maszt z odciągami,
- (b) stalowa hala przemysłowa,
- (c) wolno-stojąca wieża o stalowej konstrukcji kratowej.

Do analizy niezawodności zastosowano iteracyjną metodę perturbacyjną której wersja z rozwinięciami w szereg za pomocą wielomianów wyższego stopnia jest rozwijana od lat przez promotora Rozprawy ze swoim zespołem badawczym. Oprócz tego w badaniach zastosowano semi-analityczną metodę perturbacyjną a także metodę Monte Carlo do niezależnej weryfikacji wyników. Dla każdej z trzech wybranych konstrukcji (a), (b) oraz (c) wybrano specyficzny, subiektywnie dobrany zestaw wielkości których łączne lub osobne występowanie jako losowych jest przedmiotem analiz numeryczno-symulacyjnych.

Przyjęto założenie, że rozkłady wszystkich losowych wielkości są gaussowskie co na ogół jest niekontrowersyjnym założeniem. Jednak, gdy zmienna losowa nie może przyjmować wartości ujemnych wtedy realnie stosujemy w sposób przybliżony rozkłady ucięte co czasem związane jest ze znaczącym przybliżaniem rzeczywistości.

- Kolejnym założeniem opisanym w rozprawie na stronie 26 jest założenie, że współczynnik zmienności wielkości losowych wynosi 10%. Można zrozumieć, że w ramach metod perturbacyjnych badana zmienność losowa musi być mocno ograniczona. Jednak tak sztywne założenie sprawia wrażenie mocno ograniczającego. W typowych problemach losowych występują często zmienne losowe o zróżnicowanych współczynnikach zmienności nawet gdy są to wielkości stosunkowo małe.
- Następnym ograniczeniem to problem wzajemnej korelacji zmiennych losowych występujących „na wejściu” wszystkich analiz rozprawy. Czasami te zmienne losowe są w sposób oczywisty nieskorelowane lub nawet niezależne jak np. obciążenie śniegiem i moduł Younga materiału konstrukcji. Jednak czasami mogą one być wręcz w pełni skorelowane jak moduł Younga dwóch stalowych materiałów konstrukcyjnych, jeśli pochodząby z tej samej produkcji. Mogą one też być częściowo skorelowane jak np. obciążenie temperaturowe i obciążenie śniegiem albo obciążenie śniegiem i wiatrem. W rozprawie w ogóle nie podjęto tego wątku przyjmując milcząco, że wszystkie zastosowane zmienne losowe są nieskorelowane. Co więcej na przykład moduł Younga materiału konstrukcji może sam w sobie być polem losowym dla różnych punktów danego elementu lub całej konstrukcji a nie pojedynczą zmienną losową.

- Kolejne istotne założenie wymagające szerszej dyskusji to modelowanie obciążenia wiatrem. Jak wiadomo ekstremalny wiatr jest typowym obciążeniem dynamicznym które ma także pewną składową dynamiczną. Większość budowlanych norm wiatrowych przyjmuje reprezentowanie dynamicznej składowej za pomocą współczynnika porywów uzależnionego od wartości szczytowej porywów zliczanej w czasie 600s poprzez liczbę podstawowych okresów drgań własnych ( $\approx$  liczba pików). Tak ustalany „gust factor” wynosi od 2.5 do około 3.5 względem odchylenia standardowego stacjonarnych, 10-minutowych drgań wywołanych ekstremalnym wiatrem. Dokładniej, dynamiczna składowa wiatru jest stacjonarnym procesem stochastycznym opisywanym gęstością widmową (np. Davenporta, Harrisa, Simiu i innych). Drgająca konstrukcja „odfiltrowuje” z tego obciążenia wiatrem częstotliwości bliskie częstotliwościom drgań własnych. Gdy konstrukcja jest znacząco przesztywniona (jak np. w przypadku masztów z odciągami) to jej drgania mogą odbywać się ze zbliżonym wkładem kilku lub kilkunastu częstotliwości drgań własnych. Gdy jest to wolno stojąca wieża to dominująca postacią drgań będzie pierwsza postać drgań własnych w kierunku napływającego wiatru. Oczywiście obciążenie wiatrem obejmuje dużo więcej efektów dynamicznych zaczynając od składowej poprzecznej do napływu wiatru poprzez tzw. galopowanie, odrywanie wirów itp.

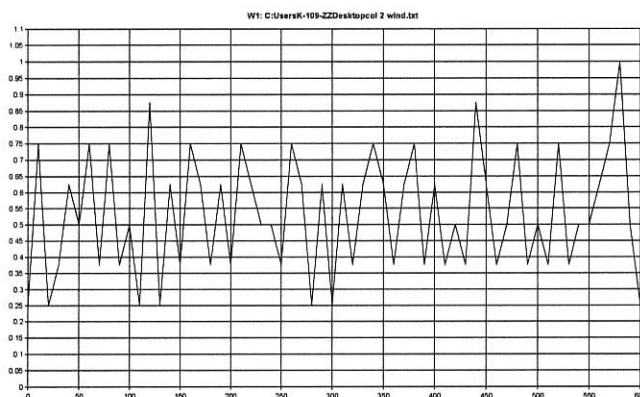
W niniejszej rozprawie dynamiczne efekty działania wiatru przyjęto w dość nietypowy sposób. Znalaziono w literaturze pewien 10-minutowy przebieg prędkości wiatru który opisany był w postaci dyskretnych wartości co 10s w przedziale od zera do 600s. W ten sposób otrzymano wzorcowy zapis dynamicznej zmienności wiatru w czasie, który wykorzystywano w obliczeniach dynamicznego całkowania równań ruchu konstrukcji w czasie metoda „krok po kroku”. **W efekcie działanie wiatru modeluje się w rozprawie jako iloczyn zmiennej losowej opisującej prędkość wiatru przez jeden deterministyczny, wybrany, 600 sekundowy przebieg zmienności prędkości wiatru.**

Jak wiemy krok całkowania równań ruchu modelu MES konstrukcji powinien być dostosowany do spektrum częstotliwości własnych konstrukcji, na ogół przyrost czasu całkowania równań ruchu to co najmniej 10 razy krótszy okres czasu niż najkrótszy istotny okres drgań własnych. W programach Robot lub Abaqus taki „zbyt rzadki” zapis jest zatem interpolowany dostosowując krok całkowania do wymagań numerycznej metody całkowania „krok po kroku”. Za duże przybliżenie uznać można zatem, że nie zastosowano 600s zapisu prędkości wiatru opisanego krokiem np. 0.005 sekundy, ale że to programy Robot i Abaqus interpolowały niezbędne pośrednie

wartości prędkości wiatru omijając w ten sposób zakres informacji o widmowej strukturze wiatru dla częstości powyżej 0.1Hz.

- Należy tu jeszcze dodać, że stochastyczny model obciążenia wiatrem jest zmiennym w czasie **polem losowym** którego przestrzenne własności opisuje funkcja korelacji (lub koherencji) przestrzennej wskazująca na fakt, że prędkość wiatru nie tylko wzrasta z wysokością ale wykazuje przestrzenne fluktuacje wskazujące na dobra korelację prędkości wiatru w strefie bliskiej i jej spadki w miarę oddalania punktów pomiarowych. Ten element rozwiązano w rozprawie w sposób mocno uproszczony za sugestią Eurokodu, poprzez obciążanie konstrukcji kilkoma kombinacjami segmentów obciążeń wiatrem nazwanymi „patches”.
- Opisane założenia odnośnie opisu wiatru wskazują że w praktyce pominięto jego widmową strukturę zostawiając jedynie wzorcowy przebieg o bardzo „zgrubnym” przebiegu. Realny porywisty wiatr może się bowiem znacząco zmieniać w ciągu 10s które w rozprawie stanowią krok czasowy w opisie dynamicznej struktury wiatru.

**Powstaje zatem pytanie czy nie lepsze byłoby w ogóle zastąpienie przebiegu dynamicznego wiatru prostą zmienną losową opisującą statyczne parcie wiatru podwyższone o losowy współczynnik porywów. Takie podejście dramatycznie zmniejszyłoby numeryczny koszt obliczeń, a zdaniem Recenzenta nie byłoby mniej dokładne w dochodzeniu do potwierdzania „niezwodnościowych” tez tej rozprawy gdy zwrócimy uwagę na zastosowane uproszczenia dynamiki opartej o pojedynczy, niedookreślony 600s (z krokiem 10s) zapis przebiegu prędkości wiatru z mnożnikiem losowym.**



Wykres: Realizacja procesu stochastycznego opisującego przebieg parcia wiatru (na podstawie: Figure 5.1.2 – Rozprawy)

- Jeśli popatrzeć na pokazany powyżej wykres stosowanego zapisu przebiegu wiatru (rysunek 5.1.2 Rozprawy) to można zauważyć kolejny problem związany z założeniami rozprawy. Otóż pokazany tam stacjonarny zapis obciążenia obrazujący

zmienność prędkości wiatru posiada współczynnik zmienności (coefficient of variation) wynoszący ponad 30%. Stosowanie gaussowskiego opisu rozkładu, nawet uciętego, dla tych wartości ewidentnie mocno odbiega od realiów pozostawiając znaczącą część gęstości ~~widmowej~~ <sup>prawdopodobieństwa</sup> po stronie wartości ujemnych. Z tego powodu prędkość wiatru na ogół nie jest opisywana rozkładami gausowskimi ale jednostronnymi rozkładami Rayleigha lub Weibula.

- Wielkości opisane w analizach rozprawy jako zmienne losowe były wprowadzone do obliczeń w postaci 11 próbek ze szczególnie wyróżnioną wartością średnią (tabele 5.1.2 dla masztu, 5.2.2 – dla hali stalowej, 5.3.2 – dla wieży kratownicowej). Można uznać że ograniczenie się do 11 próbek to jest mała liczba, jednak pozwoliło to ograniczyć koszt obliczeń numerycznych i tak bardzo duży, a nie jest to zbyt mało ze względu na dokładność uzyskanych rezultatów i wnioski końcowe.

Wyniki rozbudowanych analiz stochastycznych są przedstawione w rozdziale 6.

Przedstawiono tam zmienne w czasie 600 sekund (zgodnie z obliczaniem odpowiedzi dynamicznej na wymuszenie wiatrem) indeksy niezawodności dla różnych losowych parametrów wprowadzanych do obliczeń. Pozwoliło to wyciągnąć wnioski odnośnie wpływu tych parametrów na niezawodność dla wybranych zestawów wielkości losowych. Trochę szkoda, że nie udało się w tym miejscu uzyskać odpowiedzi na niektóre niebanalne merytorycznie ważne pytania dotyczące:

- a) wpływu korelacji wzajemnej parametrów losowych (lub jej braku) na niezawodność
- b) udziału efektów nieliniowych w indeksie niezawodności masztu z odciągami, czyli konstrukcji o szczególnie złożonej pracy statycznej i dynamicznej.

A można było na przykład przeprowadzić dwa rodzaje obliczeń – przy założeniu wyłącznie liniowej pracy konstrukcji i przy „włączeniu” nieliniowych efektów do obliczeń.

Być może połączenie jednoczesnego modelowania losowego, dynamicznego działania wiatru i losowych efektów parametrów konstrukcji w jeden system było wyzwaniem które uniemożliwiło w pełni wykorzystać aparat teorii niezawodności który jest szczególnie dostosowany do losowych zjawisk statycznych a nie do procesów stochastycznych a tym bardziej zmiennych w czasie pól losowych. W ten sposób bowiem teorię związaną z ustalaniem indeksu niezawodności sprowadzono do rozwiązywania parametrycznej dynamiki problemu statycznego w funkcji czasu 600-sekundowego przebiegu pojedynczego zapisu porywistego wiatru o losowym mnożniku amplitudowym.

## 5. SZCZEGÓŁOWE UWAGI KRYTYCZNE

5.1. Zdaniem piszącego te słowa Rozprawa ma dość nieprzyjazny dla czytelnika układ treści, a opisy wielu rysunków i tabel są ograniczone i często niejasne. Rozwiązane trzy

przykłady rozdzielono na dwie osobne części w postaci opisów danych wejściowych 5.1, 5.2, 5.3 oraz analizy wyników w postaci rozdziałów 6.2, 6.3, 6.4, a także 6.1-6.6. Zdaniem Recenzenta, znacznie lepiej byłoby pozostawić wszystkie wyniki dotyczące każdego z trzech modeli konstrukcji w osobnych rozdziałach a jedynie rozdział 6.7 pozostawić jako wydzielony.

5.2 Pierwsze czytanie rozprawy utrudniają niepełne, nieprecyzyjne lub wręcz mylące podpisy pod wieloma rysunkami jak np. „*Figure 6.1.3 Expected value history for uncertain elasticity modulus of guys*” co w tym wypadku należy odczytywać, że chodzi o wartość oczekiwaną naprężeń przy założeniu losowej zmienności modułu Younga oraz pozostałych parametrów w ich wartościach oczekiwanych”

Na szczęście Recenzent był w stałym kontakcie z doktorantem który wyjaśniał podobne nieścisłości cierpliwie, szybko i wyczerpująco. Będąc w kontakcie z doktorantem i po przygotowaniu sobie listy 10 nietypowych angielskich skrótów na osobnej kartce recenzent był już gotowy do czytania na wrywki tej trudnej w czytaniu rozprawy. Z drugiej strony nie sposób wymagać od doktoranta rezygnacji z nadmiernego stosowania nieczytelnych skrótów bo jest to szerszy problem współczesnych artykułów naukowych, gdy nie ma już korzyści ze stosowania tych skrótów z czasów gdy artykuły naukowe powstawały wyłącznie na papierze.

5.3. strona 26: Cytat: (...) *Studied input coefficient of variation of each input random parameter has been set as 0.10. In order to additionally involve some uncorrelated uncertainty structural resistance, each resistance limit has been described by the coefficient of variation of 0.01. (...)*

O ile wiadomo, że wielkości losowe tej rozprawy zostały „ustawione”, ze współczynnikami zmienności wynoszącymi 10% o tyle w przykładach tej rozprawy nigdzie nie napisano, aby losowe granice wytrzymałości (?) były ustalone ze współczynnikami wynoszącymi 1%. Wśród zmiennych losowych będących przedmiotem analiz nie ma wytrzymałości materiału. Jest to zatem informacja niezrozumiała dla czytelnika rozprawy w tym miejscu.

5.4 Strona 28, równanie 4.33. “variation” czy “variance”?

5.5 Strona 32: cytat: "These procedures are based upon probabilistic approaches and their application lead to results that for most structural applications can be considered sufficiently accurate"

To zdanie jest tyleż nieprecyzyjne co niezrozumiałe w odniesieniu do metod stochastycznych i niezawodnościowych w inżynierii lądowej których obiektywna weryfikacja jest bardzo utrudniona

5.6 strona 36, wiersz 17-16 od dołu cytat 36: (...) *non-linear performance functions which are not involved in this work* (...)

Z drugiej strony wiemy, że właśnie w tej rozprawie uwzględnia się jednak efekty nieliniowe.

5.7. strona 51 oraz 55: Figure 5.2.3 wind pressure dynamic spectrum, Figure 5.2.3 Dynamic wind velocity spectrum

W sposób oczywisty słowo „spectrum” jest tu użyte w jego popularnej formie i nie ma nic wspólnego z widmem Fouriera. Takie jego używanie w rozprawie dotyczącej dynamiki konstrukcji jest mylące.

## 6. WNIOSEK I KOŃCOWA OCENA PRACY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Rafała BREDOW jest przygotowana z dużym rozmachem i nakładem pracy. Doktorant głęboko rozpoznał bardzo trudny warsztat badawczy mechaniki stochastycznej w ujęciu iteracyjnej metody perturbacji. Na podkreślenie zasługuje znaczący potencjał badawczy znajdujący się w tej metodologii, a w szczególności zdolności do podejmowania problemów stochastycznej mechaniki konstrukcji w ujęciu nieliniowym, mimo że analizując wnioski końcowe rozprawy nie widać jeszcze aby ten potencjał był w pełni wykorzystany w analizach wrażliwości stochastycznej odpowiedzi konstrukcji.

Doktorant w pełni wykazał tezę postawioną na początku pracy o zdolności iteracyjnych metod perturbacyjnych do rozwiązywania zadań z niezawodnościowej analizy konstrukcji budowlanych. Zastosowanie metodologii stochastycznej i niezawodnościowej w zagadnieniach z elementami nieliniowej mechaniki to szczególne osiągnięcie, nieczęsto spotykane w mechanice dużych, inżynierskich konstrukcji budowlanych. Można także uznać, że większość analiz rozprawy była nastawiona na rozwiązywanie szczegółowych, technicznych aspektów sposobów obliczania stochastycznej odpowiedzi konstrukcji iteracyjną metodą perturbacyjną. Dlatego, zdaniem Recenzenta, znaczące elementy nowości naukowej znajdują się przede wszystkim w rozdziale 6.7 dotyczącego technicznej efektywności stosowanej metody. Rozprawa stanowi istotny postęp wiedzy w tym zakresie.

Biorąc powyższe pod uwagę, oraz bardzo szeroki zakres Rozprawy, uznać można, że spełnia ona wymagania ustawy: *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2018 poz. 1668) z dnia 20 lipca 2018r. z późniejszymi zmianami i może być podstawą nadania Autorowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Wnoszę o przyjęcie Rozprawy i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

