

Dr hab. inż. Ewa Pabisek, prof. PK  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Politechniki Krakowskiej  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków  
e-mail EPabisek@L5.pk.edu.pl

Kraków, 20.04.2016

**Recenzja**  
**pracy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Dudzik pt.**  
*Efektywność metody FORM na tle innych metod probabilistycznych*  
*w analizie konstrukcji prętowych*

**1. Ocena trafności wyboru tematyki i ogólna charakterystyka pracy**

Praca doktorska mgr inż. Agnieszki Dudzik, będąca wynikiem badań prowadzonych pod kierunkiem dr hab. inż. Urszuli Radoń, prof. PŚk na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej, dotyczy analizy niezawodności wybranych płaskich i przestrzennych konstrukcji prętowych. W tego typu konstrukcjach głównymi problemami są zagadnienia nośności granicznej i utraty stateczności zarówno lokalnej jak i globalnej. Autorka dokonała analizy statycznej, stateczności i dynamiki liniowych materiałowo modeli konstrukcji przyjmując jako miarę niezawodności wskaźnik niezawodności Hasofera-Linda. Szczególną uwagę poświęciła metodzie FORM, a poprawność wykonanych obliczeń zweryfikowała za pomocą metod probabilistycznych: SORM, Monte Carlo i Importance Sampling. W tym celu oszacowała błąd względny wskaźnika niezawodności, przyjmując jako wzorcową symulacyjną metodę Monte Carlo. Sprawdziła także efektywność numeryczną metody FORM przez porównanie liczby wywołań funkcji granicznej. Do analizy wykorzystwała pakiet obliczeniowy STAND, rozwijany w IPPT PAN, który służy do analizy niezawodności i optymalizacji konstrukcji. Program STAND umożliwia użytkownikowi definiowanie jawnych i niejawnych funkcji granicznych. Funkcje niejawne Doktorantka formułowała za pomocą środowiska *Mathematica*, w którym utworzyła autorski program do obliczeń symbolicznych. Funkcje niejawne były generowane dzięki integracji programu STAND z pakietami MES: KRATA i MES3D autorstwa prof. Urszuli Radoń oraz dr. Waldemara Szańca. Należy przy tym zaznaczyć, że z punktu widzenia zastosowanego podejścia obliczeniowego, doktorat mgr Agnieszki Dudzik jest kontynuacją badań prowadzonych przez Panią Promotor od wielu lat.

Tematyka dotycząca analizy niezawodności znajduje się od dawna wśród ważnych tematów badawczych w inżynierii lądowej. Zgadnienie jest bardzo trudne i wymaga stosowania zaawansowanych metod z rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Trafności wyboru tematyki pracy dowodzą prowadzone obecnie badania w wielu zespołach zagranicznych i krajowych, np. w IPPT PAN, gdzie powstały cenne i kompleksowe prace teoretyczne jak również oprogramowanie.

Zredagowana w języku polskim praca doktorska mgr Agnieszki Dudzik pt. *Efektywność metody FORM na tle innych metod probabilistycznych w analizie konstrukcji prętowych* obejmuje na 159 stronach 4 rozdziałów, bibliografię z 168 pozycjami literatury, streszczenie w języku angielskim oraz spis użytych symboli.

W rozdz. 1 przedstawione zostały przedmiot, cele, teza i zakres badań, a także szeroki przegląd literatury nt teorii niezawodności, statyki, stateczności i dynamiki konstrukcji prętowych. Rozdz. 2 zawiera podstawy analizy niezawodności. Na wstępie wprowadzane są podstawowe pojęcia, a także sformułowanie zagadnienia niezawodności. Dalej rozdz. 2 zawiera probabilistyczne podstawy statystyki oraz opis wybranych miar i metod analizy niezawodności.

Najważniejszy w pracy rozdział 3 jest poświęcony przedstawieniu i analizie wyników obliczeń otrzymanych za pomocą czterech metod analizy niezawodności: FORM, SORM, Monte Carlo i Importance Sampling, zaimplementowanych w programie STAND. Analiza niezawodności została przeprowadzona przy wykorzystaniu jawnych lub niejawnych funkcji granicznych. Przeanalizowano wpływ przyjętych zmiennych losowych na wartość wskaźnika niezawodności oraz oceniono efektywność metody FORM za pomocą liczby wywołań funkcji granicznej. Dokładność metody FORM zwerfikowano za pomocą obliczonego błędu względnego wskaźnika niezawodności odniesionego do metody Monte Carlo, którą przyjęto jako metodę wzorcową.

Rozdz. 3.1 zawiera analizę statyczną w ujęciu probabilistycznym dwóch typów konstrukcji płaskich (rama, łuk) w celu zbadania wpływu przyjętych rozkładów gęstości prawdopodobieństwa zmiennych losowych na wartość wskaźnika niezawodności. W tym przypadku kryterium awarii określono za pomocą sformułowanych w środowisku Mathematica jawnych funkcji granicznych związanych ze stanem granicznym użytkowości i nośności.

W rozdz. 3.2 skupiono się na analizie stateczności dwóch stalowych konstrukcji kratowych, podatnych na utratę stateczności poprzez przeskok węzła, oraz ramy stalowej. Podczas analizy konstrukcji kratowych do wyznaczenia wartości wskaźnika niezawodności wykorzystano niejawne funkcje graniczne formułowane za pomocą pakietu KRATA. W trakcie analizy niezawodności ramy stalowej (z rozdz. 3.1) zastosowano jawne funkcje graniczne związane ze stanem granicznym użytkowości i nośności. W tym przypadku zbadano wpływ sił ściskających na wartość wskaźnika niezawodności.

W rozdz. 3.3 zajęto się analizą dynamiczną w ujęciu probabilistycznym. Wartości wskaźnika niezawodności wyznaczono dla różnych przypadków wektora zmiennych losowych. Analizę probabilistyczną wykonano dla dwóch przykładów. W pierwszym, dotyczącym analizy drgań wymuszonych konstrukcji wsporczej, zdefiniowano jawną funkcję graniczną, którą był warunek nieprzekroczenia dopuszczalnego naprężenia dla stali oraz nieprzekroczenia niedopuszczalnej amplitudy drgań. Drugi przykład dotyczył analizy płaskiej ramy stalowej poddanej działaniu drgań wymuszonych. W tym przypadku zastosowano niejawne funkcje graniczne formułowane za pomocą programu MES3D.

Rozdz. 4 zawiera zwięźle przedstawiony przegląd wykonanych badań, wnioski i plany dalszych prac.

## 2. Ocena pracy, realizacji celu badań i oryginalnego wkładu autorki

Poziom zaawansowania zastosowanych teorii, a także metod i modeli obliczeniowych uzasadnia opinię recenzenta, że jest to rozprawa na wysokim poziomie.

W rozdz. 1.2 Autorka podała cele badań. Realizacja tych zamierzeń nie budzi wątpliwości. Oryginalne osiągnięcia mgr A. Dudzik obejmują wyniki badań wymienione przez Nią samą w podsumowaniu: zbudowanie programu MES do obliczeń symbolicznych w ramach pakietu *Mathematica* w celu formułowania jawnych funkcji granicznych, integracja programu niezawodnościowego STAND z programami MES: KRATA i MES3D

do generowania niejawnych funkcji granicznych, porównanie zastosowanych metod analizy niezawodności pod kątem ich efektywności, szczegółowa analiza wpływu zmiennych losowych na wartość wskaźnika niezawodności.

Należy zaznaczyć, że tekst pracy nie jest w stanie oddać wysiłku Autorki włożonego w przygotowanie oprogramowanie oraz wykonanie wielokrotnych, szerokich analiz numerycznych ważnego zagadnienia inżynierskiego jakim jest analiza niezawodności. Zwraca uwagę wykazywana przez Autorkę wszechstronność: praca zawiera aspekty z różnych dziedzin, modelowanie ma charakter teoretyczno-obliczeniowy. Autorka wykazała się dużą biegłością w prowadzeniu analiz numerycznych.

Tytuł dysertacji oddaje dość dobrze zawartość pracy. Układ pracy jest przemyślany, cytowana jest bogata literatura, staranna jest prezentacja analizowanych przykładów i wyników eksperymentów numerycznych. Autorka posługuje się poprawnym językiem polskim. Drobne uwagi redakcyjne zostały przedyskutowane osobiście z Autorką dysertacji. Podsumowując, dysertacja zawiera wiele analiz o dużej wartości naukowej.

#### 4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne, pytania do Autorki

Poniżej podane są uwagi i wątpliwości recenzenta, dotyczące zawartości pracy. Recenzent jest zainteresowana opiniami Autorki w zakresie poniższych zagadnień.

1. W pracy Autorka posługuje się funkcjami stanu granicznego o postaci jawnej i niejawnej. W jaki sposób zostały zweryfikowane funkcje jawne?
2. Na str. 74 (rozdz.2.5.2) Autorka pisze "W niniejszej pracy miarą niezawodności jest wskaźnik Hasofera-Linda i będzie on oznaczany symbolem  $\beta$ ". Jak obliczany jest ten wskaźnik podczas analizy niezawodności za pomocą metody Monte Carlo?
3. W rozdz. 3.3.3 (str.126) przedstawiona jest analiza niezawodności konstrukcji wsporczej pod urządzenie. W tej analizie wykorzystana została jawna postać funkcji granicznej. Z jakich powodów Autorka pominęła jej postać?
4. W pracy przedstawiona jest analiza efektywności zastosowanych metod niezawodności. Efektywność była oceniana za pomocą liczby wywołań funkcji granicznej. Powszechnie wiadomo, że największą słabością klasycznej metody Monte Carlo jest konieczność przeprowadzenia symulacji na próbie liczącej  $10^8$  realizacji zmiennych losowych. Natomiast w pracy Autorka przedstawiła, że maksymalna liczba wywołań funkcji granicznej wynosi  $10^4$ . Czy w związku z tym można mieć zaufanie do otrzymanych wyników? Wydaje się, że praca powinna zawierać przykłady testowe, które rozwiałyby wątpliwości recenzenta. Klasyczna metoda Monte Carlo jest intuicyjna i łatwa do implementacji, w związku z tym wartościowym elementem dysertacji byłoby jej uzupełnienie o własny program do analizy niezawodności za pomocą tej metody.
5. Jakie są przesłanki wyboru liczby wywołań funkcji granicznej do oceny efektywności? Taki wybór z założenia dyskwalifikuje metodę Monte Carlo. Czy nie bardziej wskazane jest zastosowanie innych metod szacowania efektywności?
6. Rysunki 32 i 40 przedstawiające ścieżki równowagi  $\mu(q)$  sugerują występowanie w konstrukcji początkowych przemieszczeń. Poprawnie narysowana ścieżka powinna zaczynać się w początku układu współrzędnych.

7. Fragmenty rozdz. 3.2.3 dotyczącego technik numerycznych są dla recenzenta niejasne. Dotyczy to w szczególności proponowanej na rys. 26 zmiany typu sterowania procesem iteracyjnym. Zaproponowane podejście jest prawidłowe ale stwarza problemy numeryczne wynikające z konieczności zmiany warunków brzegowych w trakcie trwania procesu przyrostowego. Jaki jest powód stosowania takiego podejścia kiedy służyło ono do wyznaczania punktu granicznego? Dlaczego Autorka postuluje stały przyrost parametru sterującego? Czy nie lepiej zastosować metodę adaptacyjną, która dokładnie określi współrzędne punktu granicznego?
8. Według recenzenta celowym i wartościowym byłoby umieszczenie kodu programu implementowanego przez Autorkę, a także krótkich opisów stosowanego oprogramowania STAND, KRATA i MES3D, jako załącznika do pracy.

## 5. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Dudzik jest wartościowym opracowaniem łączącym aspekty teoretyczne analizy niezawodności z wnikliwą analizą symulacji numerycznych występujących w niej zjawisk. W trakcie przygotowywania rozprawy Autorka wykazała się umiejętnością samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych (teoretycznych i numerycznych) i posługiwania się literaturą przedmiotu. Uzyskany przez Autorkę warsztat naukowy daje nadzieję na dalszy rozwój naukowy i kontynuację interesujących badań.

W związku z powyższym stwierdzam, że recenzowana praca doktorska spełnia wymagania określone art. 13 ustawy z dnia 14.03.2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22.09.2011 r. 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). Wnioskuje o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.