

## OCENA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Kolanka

pt. „*Analiza i optymalizacja niezawodnościowa konstrukcji za pomocą symulacyjnych metod adaptacyjnych*”

### Treść rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. **Krzysztofa Kolanka** pt. „*Analiza i optymalizacja niezawodnościowa konstrukcji za pomocą symulacyjnych metod adaptacyjnych*” składa się z 10 rozdziałów (174 stron maszynopisu), i spisu publikacji obejmującego 132 pozycje literatury.

W rozdziale pierwszym scharakteryzowano tematykę oraz sformułowano i uzasadniono cel i zakres pracy, a następnie, cytując podstawowe pozycje literatury, przedstawiono kierunki rozwoju metod analizy niezawodności, a w szczególności symulacyjnych metod adaptacyjnych mogących mieć zastosowanie w analizie niezawodności konstrukcji.

Rozdział drugi poświęcony jest w całości omówieniu podstawowych pojęć i metod analizy niezawodności konstrukcji, gdy losowość wielkości mających wpływ na zachowanie konstrukcji określona jest za pomocą zmiennych losowych.

W rozdziale trzecim przedstawiono sformułowanie zadania optymalizacji z uwzględnieniem ograniczeń nałożonych na prawdopodobieństwo awarii. Rozpatrzono możliwość uwzględniania dyskretnych zmiennych projektowych i omówiono dwa sposoby ich uwzględniania w procesie optymalizacji niezawodnościowej: (i) za pomocą transformacji do przestrzeni parametrów ciągłych, (ii) z wykorzystaniem metody kontrolowanego przeglądu.

W rozdziale czwartym omówiono możliwości rozwiązywania zadania niezawodności konstrukcji, gdy parametry konstrukcyjne określone są za pomocą pól losowych. W szczególności omówiono różne metody dyskretyzacji pól losowych. Zwrócono uwagę na konieczność, w pewnych przypadkach, i metody warunkowania pól losowych dla spełnienia zadanych warunków brzegowych.

W rozdziale piątym omówiono podstawowe aspekty analizy niezawodnościowej zależnej od czasu. Przedstawiono problem pierwszego przekroczenia i częstości przekroczeń warunku granicznego przez proces stochastyczny.

W rozdziale szóstym omówiono metody szacowania niezawodności systemów konstrukcyjnych.

W rozdziałach siódmym i ósmym przedstawiono dwie metody adaptacyjnej symulacji *Monte Carlo*, a mianowicie metodę wzajemnej entropii i metodę *Markov chain Monte Carlo*, i oraz pokazano możliwości ich zastosowania do szacowania prawdopodobieństwa awarii konstrukcji.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono, na przykładzie ściskanej półki blachownicy z imperfekcjami geometrycznymi, praktyczne zastosowanie omawianych wcześniej metod analizy niezawodności.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono wnioski wynikające z rozważań i przykładów numerycznych zawartych w pracy oraz sugestie, co do dalszych badań nad zastosowaniem omawianych metod w analizie niezawodności konstrukcji.

### Analiza rozprawy doktorskiej

#### **Uwagi ogólne**

Burzliwy rozwój metod analizy niezawodności konstrukcji inżynierskich w latach osiemdziesiątych zaowocował powstaniem szeregu komercyjnych pakietów numerycznych, które pozwalają szacować prawdopodobieństwo awarii lub, alternatywnie, wskaźnik niezawodności elementów konstrukcji oraz złożonych układów konstrukcyjnych przy

założeniu losowych właściwości parametrów materiałowych i obciążeń (zmiennych podstawowych). Zasadniczo wyróżnić można dwie grupy metod, które są stosowane dla uzyskania tych oszacowań. Pierwsza grupa obejmuje metody, w których poszukuje się rozwiązania problemu optymalizacji przy ograniczeniach (powierzchniach granicznych) wprowadzanych na pewne wielkości charakteryzujące odpowiedź konstrukcji (funkcje graniczne). Druga grupa, to metody symulacyjne, które oparte są na analizie statystycznej rozwiązań charakteryzujących odpowiedź konstrukcji (wartości funkcji granicznych) otrzymywanych z wykorzystaniem losowo generowanych wartości parametrów mających wpływ na zachowanie konstrukcji.

Czynnikiem decydującym o efektywności algorytmu, szczególnie w przypadku, gdy analiza konstrukcji wymaga skomplikowanych obliczeń numerycznych, jest, dla pierwszej grupy metod, liczba wartości funkcji granicznych konieczna do osiągnięcia żądanej zbieżności przy poszukiwaniu minimum funkcji celu w przestrzeni realizacji losowych zmiennych podstawowych lub, przy zastosowaniu metod symulacyjnych, liczba wartości funkcji granicznych konieczna do osiągnięcia dostatecznie małej wartości współczynnika zmienności estymatora.

Jedną z podstawowych barier dla szerszego stosowania analizy niezawodności konstrukcji w praktyce inżynierskiej jest czasochłonność, a co za tym idzie koszt obliczeń związanych z koniecznością wielokrotnego powtarzania często bardzo złożonej analizy konstrukcji. Metoda elementów skończonych wykorzystywana zwykle do analizy rzeczywistych konstrukcji o skomplikowanej geometrii, nieliniowe modele materiału czy też potrzeba uwzględniania dużych przemieszczeń konstrukcji powodują ponadto konieczność stosowania w trakcie obliczeń szeregu przybliżeń, co sprawia, że rozwiązania obarczone są błędem zarówno numerycznym jak i wynikającym z przyjętych aproksymacji. Powoduje to „zaszumienie” funkcji granicznej i, w praktyce, jej nieróżniczkowalność. W takim przypadku metody należące do pierwszej grupy, czyli klasyczne metody gradientowe do poszukiwania punktu projektowego na powierzchni granicznej stają się nieprzydatne.

Z drugiej strony, klasyczne metody symulacyjne *Monte Carlo* wymagające obliczenia setek tysięcy lub więcej wartości funkcji granicznej dla uzyskania wiarygodnego oszacowania prawdopodobieństwa awarii są nieefektywne ze względu na czasochłonność obliczeń tak wielkiej liczby realizacji funkcji granicznej. Dlatego też, poszukuje się takich modyfikacji metod symulacyjnych, które pozwolą na ograniczenie koniecznej liczby symulacji przy zachowaniu zadawalającej efektywności estymatora prawdopodobieństwa awarii.

Do takiej grupy metod należą metody *importance sampling*, w których, poprzez odpowiedni dobór funkcji gęstości będącej źródłem generowania wartości losowych parametrów projektowych, w radykalny sposób można poprawić efektywność estymatora prawdopodobieństwa awarii. Z rozważań teoretycznych wiadomo, jaką funkcję gęstości należałoby przyjąć, aby rozkład prawdopodobieństwa estymatora był jednopunktowy. W praktyce nie jest to jednak możliwe, ponieważ wymagałoby to znajomości stałej normalizującej funkcję rozkładu, której wartość jest równa szukanemu prawdopodobieństwu awarii. Dlatego też, proponowane są różne metody wyboru funkcji gęstości prawdopodobieństwa *importance sampling*, które na ogół wykorzystują informację o powierzchni granicznej, a w szczególności informację o punkcie projektowym. Jak wspomniano powyżej, ze względu na nieregularny charakter funkcji granicznej wynikający ze specyfiki rozpatrywanego problemu lub/i algorytmów obliczeniowych, nie zawsze taka informacja jest w praktyce dostępna. W takich przypadkach proponuje się różnego rodzaju adaptacyjne metody symulacyjne, w których, w zależności od historii symulacji, modyfikuje się rozkłady gęstości prawdopodobieństwa *importance sampling* służące do generowania kolejnych realizacji. Adaptacyjne metody symulacyjne, podobnie jak metoda *crude Monte Carlo*, nie wykorzystują *a priori* żadnych informacji o powierzchni granicznej i obszarze awarii, ale dzięki odpowiedniemu wykorzystaniu historii symulacji mogą istotnie polepszyć efektywność estymatora poszukiwanego prawdopodobieństwa awarii.

