

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 określane 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.

Uwagi szczegółowe

Głównym celem pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Kolanka było, według sformułowania Autora: „wyszukanie i zbadanie możliwości zastosowania w analizie niezawodności konstrukcji adaptacyjnych metod symulacyjnych, które mają dobrze opracowane podstawy teoretyczne. Ostatecznie analizie poddano metodę wzajemnej entropii (ang. *Cross-Entropy Method*) oraz metody generujące łańcuchy Markowa, które w literaturze anglojęzycznej są określane jako *Markov chain Monte Carlo*”. Niewiele jest publikacji, w których metody te byłyby omawiane w kontekście ich przydatności w analizie niezawodności konstrukcji.

W rozdziale siódmym przedstawiono teoretyczne podstawy metody wzajemnej entropii oraz adaptacyjny algorytm jej wykorzystania do szacowania prawdopodobieństwa awarii. Na klasycznych przykładach testowych stosowanych standardowo do porównywania efektywności metod szacowania prawdopodobieństwa awarii przedyskutowano efektywność metody w zależności od wymiaru zadania, postaci funkcji granicznej i złożoności problemu.

Rozdział ósmy pracy poświęcony jest w całości metodzie *Markov chain Monte Carlo*. W szczególności omówiono w nim algorytm *Metropolis-Hastings* i jego wariant adaptacyjny pozwalający w systematyczny sposób optymalizować parametry kolejnych, pomocniczych rozkładów prawdopodobieństwa na podstawie analizy dotychczasowej historii symulacji. Zwrócono uwagę na zasadnicze podobieństwo zadania szacowania prawdopodobieństwa awarii z problemem wyznaczenia stałych normalizujących funkcje prawdopodobieństwa, który rozważany jest w zagadnieniach probablistyki i w fizyce matematycznej. Przedstawiono możliwość wykorzystania adaptacyjnego algorytmu *Metropolis-Hastings* wraz z metodą wyznaczenia stałych normalizujących do szacowania prawdopodobieństwa awarii. W testowym przykładzie zastosowano to podejście porównując dwie metody wyznaczenia stałych normalizujących: *Annealed Importance Sampling* i *Linked Importance Sampling* z wynikami otrzymanymi metodą *crude Monte Carlo*. Pokazano, że dla prawdopodobieństwa awarii mniejszego niż 10^{-3} efektywność algorytmów adaptacyjnych, mierzona liczbą wartości funkcji granicznej koniecznych dla otrzymania estymatora o zadanym współczynniku zmienności, jest lepsza niż dla metody *crude Monte Carlo*, i że różnica efektywności pomiędzy tymi oszacowaniami szybko rośnie wraz ze zmniejszaniem się prawdopodobieństwa awarii.

Możliwość zastosowania w praktyce przedstawionych w pracy adaptacyjnych metod symulacyjnych szacowania prawdopodobieństwa awarii zaprezentowano na przykładzie ściskanej półki dwuteownika z losowymi imperfekcjami geometrycznymi. W modelu imperfekcji wykorzystano omówione w rozdziale czwartym pracy metody warunkowania pola losowego ze względu na zadane warunki brzegowe. Ze względu na bardzo małe prawdopodobieństwo awarii, rzędu $3 \cdot 10^{-6}$, zarówno metoda oparta na wzajemnej entropii jak i metoda oparta na *Markov chain Monte Carlo*, okazały się kilkudziesięciokrotnie bardziej efektywne niż metoda *crude Monte Carlo*. Należy jednak zauważyć, że liczba symulacji, czyli rozwiązań rozpatrywanego zagadnienia, dla najbardziej efektywnej w tym przypadku metody (opartej na wzajemnej entropii) wynosiła około 65 000.

W trzech omówionych powyżej rozdziałach recenzowanej pracy Autor w sposób dostateczny zrealizował cel sformułowany we wstępie rozprawy, czyli zbadał możliwości zastosowania w analizie niezawodności konstrukcji adaptacyjnych metod symulacyjnych, które mają dobrze opracowane podstawy teoretyczne. Wnioski wynikające z przeprowadzonych rozważań i otrzymanych wyników numerycznych zawarte w ostatnim rozdziale pracy świadczą o obiektywnym podejściu Autora do prezentowanych metod. Założenie braku jakiegokolwiek wstępnej informacji o właściwościach powierzchni granicznej i obszarze awarii wymusza zastosowanie metod symulacyjnych. Punktem odniesienia jest tu metoda *crude Monte Carlo*, w stosunku do której prezentowane w pracy metody adaptacyjne wykazują znaczną przewagę. Jednakże, ich użycie będzie zawsze wymagało tak dużej liczby symulacji, że w praktyce mogą znaleźć zastosowanie przede wszystkim wtedy, gdy obliczenia wartości funkcji granicznej nie wymagają długiego czasu obliczeń.

Ocena ogólna

Pokazanie możliwości wykorzystania adaptacyjnych metod symulacyjnych opartych na wzajemnej entropii i *Markov chain Monte Carlo*, które dotychczas nie były powszechnie stosowane w analizie niezawodności konstrukcji jest istotnym przyczynkiem poszerzającym spektrum metod mogących mieć zastosowanie przy szacowaniu prawdopodobieństwa awarii. W rozprawie mgra Krzysztofa Kolanika szczegółowo omówiono podstawy matematyczne samych metod oraz sposoby ich praktycznego zastosowania w analizie niezawodności konstrukcji. Daje to możliwość konstrukcji algorytmów obliczeniowych stanowiących alternatywę dla istniejących programów numerycznych. Zalety i wady proponowanych rozwiązań zilustrowano na standardowych przykładach testowych, a możliwości ich wykorzystania w praktyce inżynierskiej zaprezentowano na przykładzie rzeczywistego elementu konstrukcyjnego.

W rozdziałach poświęconych przeglądowi literatury oraz omawiających podstawy metod analizy niezawodności i modelowania pól losowych Autor wykazał dobrą znajomość przedmiotu, umiejętność zwięzłej prezentacji w jasny, przemyślany i uporządkowany sposób.

Uwagi krytyczne

Materiał zawarty w pracy został starannie zredagowany. Wydaje się jednak, że dla lepszej zwartości pracy i przejrzystości toku rozważań niektóre rozdziały mogłyby być pominięte. Należą do nich: rozdział 3 - „Optymalizacja niezawodnościowa” i rozdział 5 - „Niezwadność zależna od czasu”, które nic nie wnoszą w kontekście osiągnięcia zasadniczego celu pracy i jej głównego nurtu dotyczącego w istocie zastosowania adaptacyjnych metod symulacyjnych w analizie niezawodnościowej konstrukcji.

Rozdział 3 nawiązuje do wymienionej w tytule pracy „...optymalizacji niezawodnościowej...”. I chociaż zaproponowane w nim pewne pomysły mające na celu zmniejszenie czasu obliczeń w przypadku optymalizacji w dyskretnym zbiorze wartości parametrów projektowych są interesujące, to umieszczenie tego rozdziału w recenzowanej pracy sprawia wrażenie przypadkowości.

Omówione zaś w rozdziale 5 metody analizy niezawodnościowej, gdy na odpowiedź konstrukcji mają wpływ zależne od czasu stochastyczne obciążenia lub/i właściwości konstrukcji nie są wykorzystywane w dalszych częściach pracy

Należy jednak podkreślić, że te uwagi nie mają wpływu na ogólnie pozytywną ocenę wartości merytorycznej i poznawczej tych części rozprawy, które stanowią jej meritum, a mianowicie dotyczą przedstawienia możliwości zastosowania adaptacyjnych metod symulacyjnych w analizie niezawodności konstrukcji.

Wniosek końcowy

Przedłożona do oceny praca odpowiada warunkom ustaw państwowych przewidzianych dla rozpraw doktorskich. Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do obrony publicznej.


doc. dr hab. Krzysztof Doliński

Warszawa, dnia 14 marca 2007 roku