

Recenzja
rozprawy habilitacyjnej dr inż. Rafała Stockiego
pt. *Analiza niezawodności i optymalizacja odpornościowa*
złożonych konstrukcji i procesów technologicznych
oraz Jego dorobku naukowego dydaktycznego i zawodowego

Podstawa opracowania opinii

- Pismo Dyrektora Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie, prof. dr hab. Andrzeja Nowickiego, z dnia 1.06.2011r.
- Rozprawa habilitacyjna dr inż. Rafała Stockiego pt. *Analiza niezawodności i optymalizacja odpornościowa złożonych konstrukcji i procesów technologicznych*, Wydawnictwo Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, seria Prace IPPT-IFTR Reports 2, 2010, ISSN 0208-5658
- Komplet dokumentów przewodu habilitacyjnego.

1. Rozprawa habilitacyjna

1.1. Tematyka i treść rozprawy

Rozprawa habilitacyjna dr. Rafała Stockiego „Analiza niezawodności i optymalizacja odpornościowa złożonych konstrukcji i procesów technologicznych” mieści się w dyscyplinie *Mechanika* i podejmuje klasy problemów teorii niezawodności, optymalizacji i mechaniki komputerowej.

Rozdział 1 *Wstęp* (24 strony), przedstawia podjętą problematykę ze wskazaniem na różnice między analizą niezawodności i odporności, precyzuje cel i zakres pracy oraz zawiera wnikliwie opracowany przegląd literatury. Omawiając najważniejsze pozycje literatury Autor rozprawy zwięźle opisał proponowane tam metody i zamieścił ich ocenę. Przegląd literatury jest więc krytyczną oceną stanu wiedzy i uzasadnieniem podjęcia tematyki badań.

Rozdział 2 *Optymalizacja konstrukcji o parametrach losowych* (34 strony) wprowadza czytelnika w zagadnienia stochastycznej optymalizacji podejmowane w rozprawie. Autor zwięźle przedstawił deterministyczne problemy optymalizacji skalarnej i wektorowej. Na tym tle omówił najczęściej stosowane sformułowania optymalizacji niezawodnościowej i trzy strategie optymalizacji odpornościowej. Rozdział ten pokazuje różnice pomiędzy optymalizacją niezawodnościową i odpornościową. Sygnalizuje także zalety i wady tych sformułowań.

Rozdział 3 *Metody powierzchni odpowiedzi w analizie eksperymentów komputerowych* (20 stron) ma podstawowe znaczenie, bowiem ułatwia zrozumienie problemów formułowanych w dalszych rozdziałach i stanowi uzasadnienie tych sformułowań. Autor podaje podstawy metody regresji liniowej. Zwraca uwagę na to, że w przypadku analizy eksperymentów komputerowych nie jest spełnione podstawowe założenie metody regresji liniowej o nieskorelowaniu błędów aproksymacji. Wykazuje, że do analizy wyników symulacji komputerowych lepiej nadaje się metoda krigingu. Zaproponował sposób modyfikacji krigingu interpolującego, tak by mógł być stosowany do aproksymacji wyników obciążonych

szumem. Autor przedyskutował także wpływ równomierności rozłożenia punktów pomiarowych na dokładność aproksymacji. Następnie Autor omawia metodę aproksymacji lokalnej (Moving Least Squares) z wykorzystaniem ważonej regresji liniowej. Pokazuje zalety tej metody, m.in. możliwość uaktualniania współczynników wagowych w procesie optymalizacji odpornościowej w miarę zbliżania się do optimum.

Rozdział 4 nosi tytuł *Efektywne metody szacowania momentów statystycznych odpowiedzi konstrukcji* i zajmuje 54 strony. Rozdział ten podnosi kluczową sprawę numerycznej efektywności i dokładności wyznaczania momentów statystycznych, gdyż ma ona wpływ na efektywność algorytmów analizy niezawodności, a tym bardziej algorytmów optymalizacji odpornościowej, gdyż wyznaczanie momentów statystycznych jest zanurzone w wewnętrznej pętli optymalizacyjnej. Autor stosuje metody symulacyjne typu próbkowania opisowego (zdeteminowanego) ang. *Descriptive Sampling*. Metody te są znacznie bardziej efektywne niż typowa metoda Monte Carlo. Stosuje i rozwija metodę optymalnej kostki łacińskiej, którą porównuje z lepiej opisaną w literaturze metodą losowej kostki łacińskiej. Efektywność obliczania momentów statystycznych za pomocą różnych metod symulacyjnych bada na wielu przykładach różnych funkcji oraz na dwóch przykładach mechaniki. Przykłady te pozwoliły wyciągnąć wnioski dotyczące zakresów stosowalności i zalet różnych metod symulacyjnych.

Rozdział 5 pt. *Metody analizy niezawodności oraz metody poprawy niezawodności konstrukcji w przypadku zaszumionej funkcji granicznej* (33 str.) podejmuje problemy spotykane w numerycznym modelowaniu zjawisk mechanicznych za pomocą MES. Spotykamy wtedy nieliniową funkcję graniczną (często jest ona nieróżniczkowalna) i szum numeryczny. Szum może być spowodowany jawnym całkowaniem po czasie, a także stosowaniem metod adaptacyjnych MES. Autor zaproponował metodę w której stosuje się aproksymowaną funkcję graniczną i adaptacyjny sposób symulacji losowej. Metoda zaproponowana przez Autora jest niewrażliwa na szum i jest znacznie bardziej efektywna niż metoda Monte Carlo. W drugiej części rozdziału opisano opracowaną przez Autora metodę szybkiej poprawy niezawodności konstrukcji. Wykorzystuje tylko analizę korelacji bazując na symulacjach optymalnej kostki łacińskiej. Zaproponowana metoda jest szczególnie zalecana wtedy, gdy konstrukcja początkowa ma niski poziom niezawodności. Może być stosowana w pierwszym etapie optymalizacji odpornościowej. Rozwiązano przykłady pokazujące duże możliwości zaproponowanych metod.

Rozdział 6 ma tytuł *Analiza niezawodności i optymalizacja odpornościowa w zagadnieniach wytrzymałości zderzeniowej*, zajmuje 38 stron i zawiera opis zaawansowanych problemów mechaniki, występujących podczas zderzenia pojazdów. Przedmiotem analizy i optymalizacji jest belka cienkościenna zgniatana wzdłuż osi podłużnej. Celem analizy i optymalizacji niezawodnościowej oraz odpornościowej jest uzyskanie konstrukcji pochłaniającej dużą energię uderzenia. Przykład pokazuje, że jeśli podobny problem sformułować deterministycznie, to wystarczą niewielkie odstępstwa od przyjętych deterministycznie parametrów projektowych i może wystąpić inny niż przewidywano mechanizm zniszczenia, a wtedy belka nie spełni celu pochłaniania energii. Innym badanym zjawiskiem było uderzenie nogi człowieka przez samochód osobowy. Wykonano symulacje komputerowe i przeprowadzono eksperymenty fizyczne. Celem optymalizacji odpornościowej było znalezienie takich parametrów związku konstytutywnego modelu nogi i współczynnika tarcia modelu nogi o samochód by uzyskać zgodność statystyk wyników symulacji komputerowych z eksperymentami. Wyniki wszystkich przykładów pokazują skuteczność metod zaproponowanych przez Autora, nawet przy ograniczonej mocy komputerów.

Rozdział 7 p.t. *Analiza niezawodności procesu tłoczenia blach* (24 str.) podejmuje problem wyznaczenia prawdopodobieństwa wystąpienia wad w tłoczonym arkuszu blachy

podczas procesu głębokiego tłoczenia. Rozdział przedstawia wyniki współautorskiej pracy opublikowanej w 2002 roku. Rozpoczyna się od omówienia podstaw komputerowego modelowania procesu tłoczenia i stosowanych funkcji granicznych jako funkcji zachowujących założoną odległość od krzywej odkształceń granicznych. Ponieważ definicja ta nie jest ostra, więc przekroczenie funkcji granicznej jest przez Autorów traktowane jako rozmyte zdarzenie losowe, a prawdopodobieństwo awarii jako zbiór rozmyty. W analizie niezawodności zastosowano adaptacyjną metodę Monte Carlo. W wyniku analiz stwierdzono, że niezawodność silnie zależy od korelacji współczynników tarcia na powierzchniach kontaktu. Wskazali też na celowość budowania metamodelu, co pozwoli podnieść efektywność obliczeń.

Rozdział 8 p.t. *STAND – pakiet do analizy niezawodności i optymalizacji konstrukcji* (42 strony) opisuje zbiór programów komputerowych stworzony w IPPT PAN współautorstwa dr. R. Stockiego. Rozdział rozpoczyna się od omówienia stanu dostępnych programów komercyjnych i wskazania ich ograniczeń. Dalej opisano główne elementy pakietu STAND. Zaletą jego jest możliwość względnie łatwego łączenia z programami MES. Ważną cechą jest to, że w tym pakiecie znalazły się implementacje wszystkich metod tworzenia metamodelu, jakie opisano w niniejszej rozprawie.

Dodam, że każdy rozdział rozpoczyna się od wprowadzenia uzasadniającego cel rozważań i kończy się zwięzłym podsumowaniem.

Zasadnicza część pracy kończy się na stronach 255-260, gdzie przedstawiono wnioski końcowe i elementy oryginalne pracy.

Dalej następują trzy załączniki (łącznie 54 strony):

- A. *Wybrane zagadnienia komputerowej analizy niezawodności konstrukcji*
- B. *Algorytmy tworzenia optymalnych łacińskich hiperkostek*
- C. *Metody dyskretyzacji pól losowych.*

Załączniki te wyjaśniają szczegóły rozważań opisanych w zasadniczych rozdziałach pracy, a zarazem mogą służyć pomocą osobom mniej obeznanym z teorią niezawodności i metodami numerycznymi analizy niezawodności.

Pracę kończy tłumaczenie angielskich skrótów i bibliografia zawierająca 279 pozycji.

1.2. Ocena rozprawy

Rozprawa dotyczy aktualnego i bardzo ważnego problemu. Współczesne procesy technologiczne i najnowsze konstrukcje wymagają spełnienia bardzo wysokich wymagań odnośnie bezpieczeństwa, niezawodności i odporności na nieprzewidziane czynniki. Wagę problemu wystarczająco dobrze ilustruje przykład analizy niezawodności i optymalizacji odpornościowej belki cienkościennej poddanej uderzeniu osiowemu. Zadaniem tej belki jest pochłanianie energii uderzenia przez odpowiedni zgniot ścianek. Zastosowanie optymalizacji deterministycznej prowadzi do konstrukcji zawodnej, a nawet niebezpiecznej. Podobnie przekonujący i wartościowy jest przykład odpornościowego projektowania procesu głębokiego tłoczenia blach. Podjęta w rozprawie problematyka badawcza jest i będzie się plasować we froncie badań światowych.

Autor prawidłowo formułuje problemy stosując odpowiednie, wysoce nieliniowe związki fizyczne i geometryczne, a do ich rozwiązania stosuje odpowiednie metody analizy komputerowej. Jest to zadanie trudne, gdyż należy unikać nadmiernej złożoności związków fizycznych i nadmiernej czasochłonności algorytmów numerycznych. Inaczej zadania by się stały nierozwiązalnymi. Autor opracował metody oryginalne, przydatne do zastosowania w bardzo dużych i złożonych problemach. Autor wykazał dużą wiedzę, dociekliwość badawczą oraz doświadczenie w stosowaniu zaawansowanych metod numerycznych.

Za najważniejsze, oryginalne osiągnięcia Autora uważam:

- Rozwinięcie metod budowy metamodeli i ich zastosowania do analizy i optymalizacji niezawodnościowej oraz odpornościowej. Autor zbadał przydatność różnych metod aproksymacji. Wykazał efektywność równoczesnej aproksymacji funkcji celu i ograniczeń w zadaniach optymalizacji odpornościowej.
- Rozwinięcie metody ważonej regresji liniowej i zmodyfikowanej metody krigingu do aproksymacji momentów statystycznych funkcji celu i ograniczeń w problemach optymalizacji odpornościowej. Proponowana przez Autora metoda krigingu składa się z dwóch etapów. W pierwszym stosuje się metodę symulowanego wyrażania, by w kilku krokach osiągnąć przybliżony wynik. W drugim etapie stosuje się metodę nieliniowego simplex'u, prowadzącą do wyniku o zadowalającej dokładności.
- Zbadanie i wykazanie zalet metody optymalnej kostki łacińskiej w symulacjach Monte Carlo.
- Zbudowanie systemu optymalizacji niezawodnościowej i odpornościowej STAND, do którego wprowadził opracowane przez siebie algorytmy budowy metamodeli i symulacji Monte Carlo z zastosowaniem optymalnej kostki łacińskiej. Wartościową cechą jest uwzględnienie specyfiki komputerowej symulacji procesów i projektowania w mechanice. Symulacje są zwykle prowadzone za pomocą złożonych modeli MES. Są czasochłonne, a wyników nie można uznać za nieskorelowane. Co więcej, często pojawia się szum numeryczny spowodowany m.in. jawnym całkowaniem po czasie i/lub numerycznym modelowaniem kontaktu. Algorytmy proponowane przez Autora są skuteczne także w przypadku istnienia umiarkowanego szumu. Autor dużo uwagi poświęcił efektywności numerycznej rozwijanych algorytmów, tak by było możliwe rozwiązanie dużych problemów w rozsądnym czasie na umiarkowanej wielkości komputerów. Przykładem jest użycie stacjonarnej funkcji korelacji w kringingu.
- Pokazanie poprzez rozwiązane przykłady, możliwości optymalizacji odpornościowej, a także niebezpieczeństw optymalizacji deterministycznej.

1.3. Pytania i uwagi

- Rozprawa podejmuje problemy optymalizacji zarówno niezawodnościowej jak i odpornościowej. Autor przedstawia w sposób przekonujący zalety tej drugiej optymalizacji. Równocześnie sygnalizuje pewne trudności w jednoznacznym sformułowaniu uniwersalnych kryteriów optymalizacji odpornościowej. Jakim zdaniem Autora są zatem szanse by optymalizacja odpornościowa zajęła podobne miejsce jakie obecnie już zajmuje optymalizacja niezawodnościowa z dobrze określonym wskaźnikiem niezawodności i jaka jest do tego droga?
- W zagadnieniach kontaktu Autor stosował zewnętrzną funkcję kary. Czy gdyby zastosować uogólnioną metodę Lagrange'a (połączenie funkcji kary z mnożnikami Lagrange'a), szum numeryczny by się zmniejszył? Ta druga metoda wydaje się bardziej efektywna.
- Wydaje się, że rozwinięte przez Autora metody budowania powierzchni odpowiedzi konstrukcji (metamodeli) mogą znaleźć znacznie szersze pola zastosowań niż przedstawiona w pracy optymalizacja niezawodnościowa i odpornościowa w mechanice. Na przykład zastosowania na polach związanych z ekonomią i zarządzaniem. Czy Autor spotkał takie prace?

- Rozprawę zredagowano bardzo dobrze zarówno pod względem sekwencji logicznej jak i staranności redakcyjnej. Wyrazić mogę jedynie następujące uwagi adresowane do Autora lub do Wydawnictwa. Rozprawa mogła by rozpoczynać się od spisu podstawowych oznaczeń i skrótów. Odnośnie skrótów, Autor zamieścił na str. 315 rozdział p.t. *Tłumaczenie angielskich skrótów*. Jest on bardzo cenny, ale lepiej gdyby był umieszczony na początku rozprawy. Przy poszczególnych nazwach mógł być dodany numer strony rozprawy, gdzie termin ten został szerzej omówiony. Pomyłek typu „literówek” jest bardzo mało. Wspomnieć wypada, że Autor wielokrotnie używa wyrażenia „przy pomocy” tam gdy należało użyć „za pomocą”.

W podsumowaniu oceny stwierdzam, że rozprawa habilitacyjna dr. inż. Rafała Stockiego wnosi znaczący, oryginalny wkład do nauki w dziedzinie *Nauki Techniczne*, dyscyplinie *Mechanika*. **Oceniam, rozprawę jako wyróżniającą się wysokim poziomem.**

2. Sylwetka, aktywność badawcza i dorobek naukowy Habilitanta

Mgr inż. Rafał Stocki ukończył studia w roku 1995 na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. w specjalności *Teoria konstrukcji*. W latach 1995-98 był słuchaczem studium doktoranckiego w IPPT PAN. W 1999r. uzyskał w IPPT PAN stopień doktora n.t. na podstawie rozprawy p.t. *Niezawodnościowa optymalizacja konstrukcji prętowych w zakresie dużych przemieszczeń – teoria i program komputerowy*, której Promotorem był prof. M. Kleiber. Rozprawa ta została wyróżniona w konkursie na najlepszą pracę doktorską organizowanym przez PAN. Wyniki badań zostały opublikowane w formie artykułów w *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1999 oraz *Engineering Transactions* 2001. W roku 2000 awansował na stanowisko adiunkta w Pracowni Niezawodności i Optymalizacji IPPT PAN. Wspólnie z M. Kleiberem i J. Rojkiem prowadził badania nad analizą niezawodności głębokiego tłoczenia blach. Wyniki zostały opublikowane w *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* w 2002r. Autorzy zaproponowali oryginalną metodę wykorzystania powierzchni odpowiedzi. Praca była cytowana ponad 25 razy.

Ważnym etapem w rozwoju naukowym habilitanta był dwuletni (2001-2003) staż naukowy we Francji w Antony pod Paryżem w firmie Mecalog, przodującej na świecie w komputerowym modelowaniu zjawisk zderzenia pojazdów. Do rozwijanych tam modeli dr Stocki wprowadził procedury analizy wrażliwości stosując metodę bezpośredniego różniczkowania (direct differentiation method) w sformułowaniu stochastycznym, efektywne oryginalne metody symulacji losowych oraz statystyczne metody analizy symulacji losowych. Rozwinął tam koncepcję metamodeli z wykorzystaniem kostki łącińskiej. Z ośrodkiem w Antony współpracowali wybitni w skali światowej naukowcy w dziedzinie crash-test i metod stochastycznych w mechanice. Kontakty tam zawiązane zaowocowały dalszą współpracą z przodującymi ośrodkami we Francji, Niemczech i Danii, po powrocie Habilitanta do kraju. W roku 2004 Pracownia Niezawodności i Optymalizacji IPPT PAN została zaproszona przez firmę Mecalog do udziału w 5-cio letnim projekcie międzynarodowym APROSYS, co pośrednio było potwierdzeniem kompetencji naukowych i umiejętności pracy zespołowej Habilitanta. W ramach tego projektu zrealizowano badania na temat odpornościowego projektowania elementów pojazdu, tak by zagwarantować odpowiednie pochłanianie energii i modelowanie testów uderzenia pieszego przez samochód. Badania te zostały opisane w publikacjach i w rozprawie habilitacyjnej. W roku 2006-09 w ramach projektu DIADYN, zespół pracowników IPPT PAN (doc. dr Tomasz Szolc, dr Piotr Tausowski, dr Jarosław Knabel i dr Rafał Stocki) podjął badania n.t. metod identyfikacji defektów w wałach maszyn wirnikowych na podstawie pomiarów ich

drgań. Wyniki badań opisano w artykułach opublikowanych w CAMES 2007, Int. J. of Crashworthiness 2008, Nonlinear Dynamice 2009, Mechanical Systems and Signal Processing 2009. Dr Stocki kontynuował badania nad dynamiką wałów maszyn obrotowych rozszerzając problematykę na optymalizację odpornościową. Wyniki zaprezentował na kongresie w Korei Pd. Praca ta została zaliczona do 10-ciu najlepszych i skierowana do druku w specjalnym wydaniu prestiżowego czasopisma Mechanical Systems and Signal Processing. Od 2009 roku kieruje realizacją dwóch zadań badawczych w projekcie NUMPRESS. Zadania te dotyczą metod numerycznych analizy, optymalizacji i niezawodności przemysłowych procesów tłoczenia blach.

Dr Rafał Stocki uczestniczył jako wykonawca w 19 badawczych, z czego 7 to poważne projekty międzynarodowe.

Dr inż. Rafał Stocki wykazał się dużą aktywnością badawczą. Po doktoracie aktywność jeszcze wzrosła. Łącznie po doktoracie opublikował 13 prac w bardzo renomowanych czasopismach naukowych. Większość tych publikacji jest współautorska, jednak Habilitant wniósł do nich istotny, czasem decydujący merytoryczny wkład. Wynika to jednoznacznie z oświadczeń współautorów, z analizy udokumentowanego rozwoju naukowego dr. Stockiego i z faktu zapraszania Go do udziału w zespołach badawczych realizujących kolejne międzynarodowe projekty badawcze.

4. Wniosek

Biorąc pod uwagę pozytywną ocenę przedstawionej rozprawy habilitacyjnej i dorobku naukowego stwierdzam, że dr inż. Rafał Stocki posiada odpowiednie kwalifikacje naukowe umożliwiające samodzielne prowadzenie badań naukowych i kierowanie zespołami badawczymi. Jego rozprawa habilitacyjna stanowiąca znaczny, oryginalny wkład w rozwój nauki w dyscyplinie naukowej *Mechanika* oraz bogaty dorobek publikacyjny mogą służyć za podstawę rozpatrzenia wniosku o nadanie Mu stopnia naukowego doktora habilitowanego nauk technicznych. Wobec spełnienia wszystkich wymogów Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65 poz. 595) **stawiam wniosek o dopuszczenie dr. inż. Rafała Stockiego do kolokwium habilitacyjnego przed Radą Wydziału Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk.**

Prof. Andrzej Garstecki