

R e c e n z j a

rozprawy habilitacyjnej pt.

**„Analiza niezawodności i optymalizacja odpornościowa złożonych
konstrukcji i procesów technologicznych”**

oraz całokształtu dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego

dr inż. Rafała Stockiego

opracowana na podstawie zlecenia Dyrektora IPPT PN z dnia 01.06.2011 r.

1. Informacje ogólne

Dr inż. Rafał Stocki ukończył w 1995 roku studia na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Bezpośrednio po uzyskaniu dyplomu, w latach 1995-1998 był słuchaczem studiów doktoranckich w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. W 1999 roku obronił pracę doktorską pt. „Niezawodnościowa optymalizacja konstrukcji prętowych w zakresie dużych przemieszczeń – teoria i program komputerowy. W 2000 roku praca ta otrzymała wyróżnienie w konkursie na najlepszą pracę doktorską organizowanym przez Fundację Nauk Systemowych przy Polskiej Akademii Nauk. Od końca 1998 roku do roku 2000 pracował w IPPT PAN na stanowisku programisty. W 2000 roku został zatrudniony na stanowisku adiunkta w Pracowni Niezawodności i Optymalizacji. We wrześniu 2001 roku w ramach programu stypendialnego Marie Curie Industry Host Fellowship wyjechał do Francji na dwuletni staż naukowy organizowany przez Firmę Mecalog. W październiku 2010 roku opublikował w serii „Prace IPPT” swoją rozprawę habilitacyjną, w której zawarł swoje osiągnięcia z wielu lat pracy nad rozwojem algorytmów numerycznych służących analizie stochastycznej złożonych konstrukcji i procesów technologicznych głębokiego tłoczenia blach.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy habilitacyjnej

Modelowanie właściwości statycznych i dynamicznych nowoprojektowanych oraz modyfikowanych maszyn i urządzeń oraz ocena cech użytkowych procesów technologicznych metodami symulacyjnymi są obecnie nieodzownymi elementami procesu projektowo konstrukcyjnego. Temat rozprawy dr inż. Rafała Stockiego należy zatem uznać za aktualny. Ma on duże znaczenie z punktu widzenia nauki i praktyki przemysłowej.

Rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów i trzech dodatków. We wstępie, na tle problemów związanych z wirtualnym prototypowaniem i optymalizacją właściwości maszyn i procesów technologicznych Autor uzasadnia podjęcie tematu rozprawy i określa jej zakres. Jasno i precyzyjnie formułuje cel i główne oryginalne problemy, które będą rozwiązane w rozprawie. Celem rozprawy było opracowanie metod i algorytmów numerycznych umożliwiających analizę stochastyczną złożonych konstrukcji i procesów technologicznych, w tym głównie:

- wyznaczenie rozkładu prawdopodobieństwa i jego parametrów opisowych zmiennych wyjściowych, oceniających cechy użytkowe konstrukcji lub procesu technologicznego będących wynikiem oddziaływania losowych zmiennych wejściowych,
- oszacowanie prawdopodobieństwa awarii konstrukcji lub procesu technologicznego,
- optymalizację kryteriów oceniających cechy użytkowe konstrukcji lub procesów technologicznych, gdzie oprócz wartości średnich minimalizuje się ich wariancje.

Opracowane metody zaimplementowano w obiektowo zorientowanym programie STAND, który współtworzony był przez Autora rozprawy w ramach badań prowadzonych w Pracowni Niezawodności i Optymalizacji Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Stworzenie takiego programu do analizy stochastycznej konstrukcji i procesów technologicznych, przeznaczonego zarówno do analizy niezawodności jak i optymalizacji wraz z jego integracją z komercyjnymi pakietami obliczeniowymi MES, było dużym wyzwaniem w dziedzinie informatyki i też stanowi istotną wartość dorobku Habilitanta.

W rozdziale drugim „Optymalizacja konstrukcji o parametrach losowych” Autor najpierw dokonuje przeglądu różnych sformułowań zadania optymalizacji konstrukcji. Rozpoczyna od przedstawienia zadania jednokryterialnej optymalizacji o zmiennych decyzyjnych zdeterminowanych. Dokonuje, krótkiego przeglądu metod optymalizacji lokalnej metodami gradientowymi i bezgradientowymi i metod optymalizacji globalnej. Słusznie stwierdza, że wspomniane algorytmy wymagają dużej ilości obliczeń funkcji celu, przy stosunkowo dużej liczbie zmiennych decyzyjnych a ponadto gdy kryteria optymalizacji dane są w sposób niejawnny (są np. wynikiem rozwiązania dużego modelu MES), czasy obliczeń są bardzo długie, a co za tym idzie koszt rozwiązania zadania jest zbyt duży. Następnie Autor krótko omawia zagadnienia wielokryterialne optymalizacji konstrukcji przedstawiając idee zbioru Pareto i ograniczając się właściwie do omówienia metody polegającej na zastąpieniu zbioru kryteriów, jednym kryterium globalnym będącym sumą ważoną kryteriów składowych.

W podrozdziale 2.3 Autor przedstawia problem optymalizacji niezawodnościowej. Formułuje zadanie i przedstawia metody rozwiązania. Podsumowując ten fragment pracy Autor przedstawia wady tego sposobu podejścia, co jest impulsem do oryginalnego sformułowania przez Autora w rozdz. 2.4 tzw. optymalizacji odpornościowej (tak naprawdę optymalizacji dwukryterialnej z przeszukiwaniem zbioru rozwiązań dopuszczalnym za pomocą planu eksperymentu numerycznego o równomiernym rozkładzie punktów planu w przestrzeni parametrów i uwzględnieniu rozkładów prawdopodobieństwa zmiennych decyzyjnych). Następnie Autor przedstawia metody rozwiązania tak sformułowanego zadania optymalizacji wymagającej aproksymacji powierzchni odpowiedzi dla niejawnnych funkcji kryteriów i ograniczeń. Utworzone powierzchnie odpowiedzi używa się następnie (z wybraną metodą szacowania wartości oczekiwanych i wariancji funkcji zmiennych losowych) do wyznaczania optymalnych wartości zmiennych. Autor następnie omawia różne strategie aproksymacji charakterystyk preferując metodę krigingu, a następnie przedstawia algorytm rozwiązania problemu. Podsumowując ten rozdział Autor stwierdza, że sformułowaniem metody optymalizacji niedeterministycznej, która lepiej dopasowana jest do realiów projektowych jest tzw. optymalizacja odpornościowa, ale złożoność obliczeniowa zadania wymaga zastosowania odpowiednich aproksymacji nieznanymi w jawnej postaci powierzchni konstrukcji a także użycie efektywnych metod szacowania momentów zmiennych losowych Autor w tym rozdziale zaproponował trzy możliwe strategie optymalizacji, preferując jedną z nich jako najbardziej efektywną. Wszystkie

przedstawione strategie Autor zaimplementował w tworzonej przez siebie bibliotece optymalizacyjnej programu STAND.

W rozdziale trzecim Autor omawia zastosowanie metod powierzchni odpowiedzi w analizie wyników eksperymentów numerycznych. Rozważane są metody klasycznej analizy regresji, ważonej, krigingu i metody aproksymacji lokalnej. Autor wykazał, że metodą najbardziej przydatną do analizy nieliniowych kryteriów oceny jakości konstrukcji jest zmodyfikowana przez Niego metoda krigingu. Przedstawiono wyniki analizy wpływu równomierności rozmieszczenia punktów w przestrzeni parametrów na błąd dopasowania. Kriging i metoda aproksymacji lokalnej są podstawowymi cegiełkami algorytmów rozwiązywania problemów optymalizacji w proponowanych przez Autora algorytmach. Autor wykazał ponadto, że wykorzystanie planów eksperymentów OLH proponowanych w pracy poprawia dopasowanie funkcji aproksymujących.

Rozdział czwarty poświęcony jest analizie metod estymacji momentów statystycznych kryteriów oceniających cechy użytkowe konstrukcji. Przedstawiono ideę symulacyjnych metod planowania eksperymentów z użyciem kostek OLH i porównano je z klasycznymi metodami Monte Carlo wykorzystującymi generatory liczb pseudolosowych o rozkładzie równego prawdopodobieństwa. Porównano efektywność różnych metod symulacyjnych dla kilku funkcji testowych, a także dwóch problemów mechaniki (kratownica Misesa i płyta wspornikowa). Wyniki analiz pozwoliły Autorowi zaproponować metody doboru wielkości próbki na potrzeby rozwiązywanego zadania optymalizacji, wykorzystującego plan eksperymentu o równomiernym rozmieszczeniu punktów w przestrzeni parametrów.

W rozdziale piątym Autor przedstawia propozycje oryginalnego, dwuetapowego algorytmu (Z3M) będącego narzędziem do szacowania prawdopodobieństwa awarii konstrukcji przy obecności szumu numerycznego pojawiającego się przy rozwiązywaniu modeli metodą elementów skończonych. Proponuje też algorytm poprawy niezawodności konstrukcji wykorzystujący symulacje w punktach optymalnego planu eksperymentu numerycznego, bez użycia metod powierzchni odpowiedzi.

W rozdziale szóstym przedstawione są przykłady techniczne zastosowania opracowanych przez Habilitanta metod i oprogramowania: analizę niezawodności dynamicznie zgniatanej belki cienkościennej z uwzględnieniem losowych awarii połączeń zgrzewanych oraz poprawę jej niezawodności, analizę niezawodnościową elementu ramy samochodowej zgniatanej dynamicznie przez poruszającą się ze stałą

prędkością sztywną przeszkodę oraz identyfikację parametrów modelu fantomu dolnej kończyny człowieka wykorzystującą opracowane metody optymalizacji.

W rozdziale siódmym Autor prezentuje przykład analizy niezawodności procesów tłoczenia blach. Tłoczenie blach rozpatrywano jako zadanie dynamiki stosując jawny schemat całkowania równań ruchu z uwzględnieniem dużych odkształceń sprężysto-plastycznych, zjawisk tarcia i kontaktu oraz silnie nieliniowych związków konstytutywnych. Definiuje funkcje graniczną bazującą na wykresie odkształceń granicznych. Do szacowania wartości prawdopodobieństwa awarii wykorzystuje adaptacyjną metodę Monte Carlo. Wprowadza koncepcję rozmytego prawdopodobieństwa awarii.

W rozdziale ósmym opisano program komputerowy STAND, który współtworzony był przez Autora w Pracowni Niezawodności i Optymalizacji Zakładu Metod Komputerowych IPPT PAN. Jest on przeznaczony do analizy niezawodności i optymalizacji konstrukcji.

Należy podkreślić wagę przyjęcia obiektowo zorientowanej architektury oprogramowania oraz fakt opracowania interfejsów do komercyjnych programów MES (ABAQUS i RADIOSS). Program STAND był używany przez Autora do realizacji większości prezentowanych w pracy habilitacyjnej przykładów obliczeniowych.

We wnioskach końcowych Autor przedstawia oryginalne osiągnięcia pracy a także przedstawia dalsze kierunki rozwoju tematyki rozprawy.

W trzech załącznikach Autor przedstawia informacje na temat:

- wybranych metod komputerowej analizy niezawodności konstrukcji,
- algorytmów tworzenia optymalnych łańcuchów hiperkostek,
- metod dyskretyzacji pól losowych.

Recenzowana rozprawa stanowi znaczący wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej mechanika. Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć Autora zaliczam:

- opracowanie metod i algorytmów rozwiązywania zadań optymalizacji konstrukcji i procesów technologicznych wykorzystujących plany eksperymentu numerycznego o równomiernym rozmieszczeniu punktów w przestrzeni parametrów umożliwiającą:
 - analizę niezawodności z oszacowaniem prawdopodobieństwa awarii konstrukcji lub procesu technologicznego,

- minimalizację wartości średnich i wariancji kryteriów oceniających cechy użytkowe konstrukcji lub procesów technologicznych,
 - oszacowanie parametrów opisowych rozkładów prawdopodobieństwa kryteriów optymalizacji.
- przedstawienie przykładów obliczeniowych dotyczących analizy niezawodności i optymalizacji będących pozytywną weryfikacją opracowanych metod obliczeń,
 - opracowanie programów komputerowych do stochastycznej analizy konstrukcji, realizujących opracowane przez Autora algorytmy,
 - udoskonalenie algorytmów budowy optymalnych planów eksperymentu numerycznego w przestrzeniach wielowymiarowych poprzez opracowanie dedykowanego algorytmu genetycznego,
 - propozycję zastosowania zmodyfikowanej wersji krigingu do aproksymacji parametrów opisowych funkcji celu i ograniczeń.

Uwagi krytyczne i kwestie dyskusyjne.

1. Autor przy omawianiu planów eksperymentów numerycznych pomija pseudolosowe ciągi LP_i o bardzo równomiernym rozmieszczeniu punktów w przestrzeni parametrów. Są one powszechnie stosowane w wielu dziedzinach nauki, szczególnie z zadaniami o dużej liczbie zmiennych decyzyjnych.
2. Przy omawianiu losowości parametrów opisujących konstrukcję Autor dostrzega jedynie losowy rozrzut wymiarów, parametrów opisujących materiał i obciążeń. Pomija natomiast bardzo dużą niepewność dotyczącą tłumienia. Przy obecnym poziomie procesów wytwarzania dokładności wymiarów są wielokrotnie większe od możliwości oszacowania tłumienia i sztywności w połączeniach stałych i ruchomych elementów konstrukcji.
3. W wielu przykładach brak uzasadnienia przyjęcia określonego modelu rozkładu prawdopodobieństwa zmiennych losowych oraz wartości odchylenia standardowego. Na przykład w tabeli 6.1 dla grubości blach przyjmuje się rozkład lognormalny mimo, że wymiary tolerowane są symetrycznie. Dla modułu Younga $\sigma=21\text{Gpa}$. Z informacji uzyskanych przez recenzenta E dla blach samochodowych zmienia się od 206-210Gpa. W związku z tym odchylenie standardowe jest dużo mniejsze.

3. Charakterystyka i ocena dorobku naukowego

Publikowany dorobek naukowy dr inż. Rafała Stockiego po ostatnim okresie naukowym obejmuje: monografię (rozprawa habilitacyjna, 13 artykułów w recenzowanych czasopismach, 3 rozdziały w monografiach naukowych, 21 prac opublikowanych w materiałach konferencyjnych, 9 niepublikowanych opracowań naukowych, głównie w ramach 6 Programu Ramowego Unii Europejskiej. Należy podkreślić, że prace naukowe Habilitanta opublikowane są w większości w czasopismach międzynarodowych o bardzo wysokiej renomie: Mechanical Systems and Signal Processing, Nonlinear Dynamics, Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Computers and Structures, Journal of Statistical Planning and Inference, International Journal of Crashworthiness. Są to wprawdzie prace zespołowe, ale według oświadczeń współautorów wkład własny Habilitanta w te prace jest dominujący. Należy również podkreślić, że dr inż. Rafał Stocki był głównym wykonawcą w 11 grantach KBN.

Prace naukowe dr inż. Rafała Stockiego są głównie skoncentrowane w obszarze komputerowych metod analizy właściwości statycznych i dynamicznych konstrukcji i procesów technologicznych. Głównymi metodami jego działalności naukowej są: niezawodność procesów głębokiego tłoczenia blach, optymalizacja odpornościowa konstrukcji, efektywne metody symulacji losowych i analiza stochastyczna w zagadnieniach symulacji zderzeń pojazdów. Habilitant jest opiekunem naukowym pracy doktorskiej poświęconej optymalizacji procesów tłoczenia blach.

Dorobek naukowy dr inż. Rafała Stockiego jest bogaty i wartościowy i zdaniem recenzenta spełnia w stopniu wystarczającym wymagania stawiane przez Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym i może stanowić podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego w dyscyplinie „mechanika”.

Dorobek ten sprawia, że dr inż. Rafał Stocki jest uznanym specjalistą w zakresie analizy stochastycznej i optymalizacji złożonych konstrukcji i procesów technologicznych. Jego osiągnięcia naukowe zawarte w publikacjach są istotne dla rozwoju dyscypliny naukowej „mechanika”.

4. Ocena dorobku dydaktycznego i organizacyjnego

Dorobek dydaktyczny dr inż. Rafała Stockiego, ze względu na pracę w instytucie naukowym nie może być bogaty. Nie mniej podczas pobytu w International Center for Numerical Methods in Engineering na Politechnice Katalońskiej w Barcelonie przygotował edukacyjną wersję programów do nauki mechaniki budowli, którą następnie zaprezentował na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.

Działalność organizacyjna dr inż. Rafała Stockiego polega głównie na współpracy z wieloma ośrodkami zagranicznymi przy realizacji projektów badawczych i organizacji konferencji naukowych.

Działalność dydaktyczną i organizacyjną Habilitanta oceniam pozytywnie.

5. Wnioski końcowe

Podsumowując przedstawioną ocenę rozprawy habilitacyjnej i dorobku naukowego stwierdzam, że pozytywną ich ocenę uzasadniają:

1. Naukowa wartość rozprawy habilitacyjnej pt.: „Analiza niezawodności i optymalizacja odpornościowa złożonych konstrukcji i procesów technologicznych”.
2. Zgromadzony dorobek naukowy po ostatnim awansie, stanowiący istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej „mechanika”.
3. Osiągnięcia pełnej samodzielności w kierowaniu zadaniami badawczymi.

Stwierdzam, że rozprawa habilitacyjna i dorobek naukowy dr inż. Rafała Stockiego spełniają wymagania Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i mogą być podstawą do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie „mechanika”.

Wnoszę o dopuszczenie dr inż. Rafała Stockiego do kolokwium habilitacyjnego.

