

dr inż. Rafał Stocki

Pracownia Niezawodności i Optymalizacji
Zakład Metod Komputerowych
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

AUTOREFERAT

Przebieg pracy naukowo-badawczej

W roku 1995 ukończyłem studia na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej na specjalności Teoria Konstrukcji. Pracę magisterską *Fizyczne funkcje kształtu w analizie powłok obrotowych* przygotowałem pod kierunkiem doktora Wojciecha Gilewskiego. W pracy przedstawiłem budowę tzw. fizycznych funkcji kształtu dla wybranych typów powłok obrotowych w stanie obrotowo-symetrycznym, które posłużyły do wyznaczenia ścisłych macierzy sztywności w przemieszczeniowym modelu MES. W ramach prac nad dyplomem stworzony został program komputerowy ZBIORNIK, który używany był następnie jako pomoc dydaktyczna w ramach zaawansowanego kursu metody elementów skończonych na specjalności Teoria Konstrukcji. Wyniki pracy magisterskiej zaprezentowano również na międzynarodowej konferencji naukowej [5].

Bezpośrednio po studiach, w latach 1995-1998 byłem słuchaczem studium doktoranckiego w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. Uczestnicząc w licznych pracach i projektach Pracowni Metod Komputerowych IPPT w 1999 roku obroniłem rozprawę doktorską zatytułowaną *Niezawodnościowa optymalizacja konstrukcji prętowych w zakresie dużych przemieszczeń - teoria i program komputerowy* [12]. Promotorem doktoratu był profesor Michał Kleiber. Celem pracy było teoretyczne opracowanie oraz implementacja komputerowa zagadnień niezawodnościowej optymalizacji geometrycznie nieliniowych konstrukcji prętowych. Zbudowany przeze mnie komputerowy system OPTIREL łączył wyspecjalizowany komercyjny kod analizy niezawodności, moduł optymalizacyjny oraz moduł analizy wrażliwości nieliniowych geometrycznie układów konstrukcyjnych, który wchodził w skład programu metody elementów skończonych. Szczególny nacisk położony został na wyposażenie systemu w szereg rozwiązań optymalizacji interaktywnej. Umożliwiło to znaczną redukcję złożoności obliczeniowej zadania optymalizacji niezawodnościowej. Na przykładzie systemu OPTIREL pokazano, że projektowanie konstrukcji wspomagane przez system optymalizacji niezawodnościowej stanowi bardziej racjonalną metodę projektowania w stosunku do metod tradycyjnych, w których odpowiedni poziom niezawodności zapewniany jest przez stosowanie tzw. wartości charakterystycznych parametrów projektowych i częściowych współczynników bezpieczeństwa. Przydatność systemu przetestowano na przykładach wielu konstrukcji kratowych, w tym przestrzennych konstrukcji podatnych na utratę stateczności globalnej. W 2000 roku przygotowana przeze mnie praca otrzymała wyróżnienie w konkursie na najlepszą pracę doktorską organizowanym przez Fundację Krzewienia Nauk Systemowych przy Polskiej Akademii Nauk.

W trakcie studiów doktoranckich brałem również udział w szeregu projektów i prac badawczych nie związanych bezpośrednio z tematyką mojego doktoratu. Spośród nich należy wspomnieć prawie roczny projekt realizowany we współpracy z mgr inż. Dariuszem Wiackiem pod kierownictwem profesora Jana Holnickiego-Szulca dotyczący sporządzenia modelu numerycznego kościoła Św. Jana w Gdańsku. Kościół ten jest jednym z najcenniejszych zabytków architektury gotyckiej Gdańska. Przestrzenny model składający się z setek tysięcy elementów bryłowych oraz z elementów powłokowych posłużył następnie magistrowi Wiackowi do zbudowania komputerowego systemu wspomagającego monitoring tej historycznej budowli.

W 1996 roku uczestniczyłem w projekcie zleconym przez firmę Shell International Exploration and Production B.V. dotyczącym możliwości zastosowania metody stochastycznych elementów skończonych w zagadnieniach nieliniowego i nieustalonego przepływu ciepła w ośrodkach o parametrach losowych. Kierownikiem projektu był profesor Michał Kleiber, a głównym wykonawcą docent Tran Duong Hien. Moje zadanie polegało na implementacji metody obliczania wektora wartości średnich oraz macierzy kowariancji temperatur w węzłach siatki modelującej złoża skalne w charakterystycznych chwilach procesu ich sedimentacji. Implementacji dokonałem bezpośrednio w używanym przez firmę Shell programie CAULDRON, który służył do analizy historii termicznej roponośnych złóż skalnych. W trakcie realizacji zadania przez wiele tygodni przebywałem w siedzibie firmy w Rijswijk w Holandii.

Pracując nad systemem optymalizacji niezawodnościowej OPTIREL miałem okazję skonsultować wyniki moich badań z wieloma wybitnymi uczonymi w dziedzinie analizy niezawodności konstrukcji, takimi jak profesorowie Rudiger Rackwitz, Ove Ditlevsen i Armen Der Kiureghian oraz doktor Stephan Gollwitzer. W 1999 roku brałem udział w dwutygodniowym kursie na temat niezawodności konstrukcji oraz stochastycznego modelowania obciążeń organizowanym przez profesora Ove Ditlevsena w Lyngby w Danii. Spośród naukowców polskich najczęściej współpracowałem z doktorem Andrzejem Siemaszką, profesorem Michałem Kleiberem oraz docentem Krzysztofem Dolińskim. Moje publikacje z tego okresu dotyczyły przede wszystkim zagadnień związanych z nowymi, interaktywnymi technikami realizacji zadania optymalizacji niezawodnościowej konstrukcji.

Od końca 1998 roku do roku 2000 pracowałem w IPPT PAN na stanowisku programisty. Po obronie pracy doktorskiej, w 2000 roku zatrudniony zostałem na stanowisku adiunkta w kierowanej przez profesora Stefana Jendo Pracowni Niezawodności i Optymalizacji. Kontynuując pracę nad optymalizacją niezawodnościową konstrukcji prętowych, wspólnie z mgr inż. Krzysztofem Kolankiem zaproponowałem algorytmy pozwalające na uwzględnienie w klasycznym sformułowaniu tego zadania zmiennych projektowych dyskretnych i dyskretno-ciągłych. Ponadto, współpracując z docentem Dolińskim, przedstawiłem propozycję uwzględnienia w zadaniu optymalizacji niezawodnościowej zmiennych projektowych odpowiadających odchyleniom standardowym zmiennych losowych. Modyfikacja ta wymagała uwzględnienia w definicji funkcji celu kosztów związanych z jakością produkcji i montażu elementów oraz jakością zastosowanych materiałów.

Pod kierownictwem profesora Kleibera wspólnie z doktorem Jerzym Rojkiem zajmowałem się analizą niezawodności procesów głębokiego tłoczenia blach. Badany był wpływ losowości parametrów procesu na prawdopodobieństwo wystąpienia wady wytłoczki w postaci pęknięcia. Charakterystyczna dla tych problemów postać funkcji awarii narzucała konieczność zastosowania adaptacyjnych metod symulacji losowych bądź też technik wykorzystujących koncepcję

powierzchni odpowiedzi. Opublikowany wspólnie z profesorem Kleiberem i doktorem Rojkiem artykuł [7], zawierający wyniki przeprowadzonych prac, uznać można za prekursorski dla tej dziedziny. Potwierdza to duża liczba jego cytowań (25).

Zarówno w czasie trwania studiów doktoranckich jak też po ich zakończeniu, brałem udział jako wykonawca w wielu grantach KBN poświęconych analizie wrażliwości, optymalizacji i analizie niezawodności konstrukcji.

We wrześniu 2001 roku w ramach programu stypendialnego Marie Curie Industry Host Fellowship wyjechałem do Francji do miejscowości Antony pod Paryżem na dwuletni staż naukowy organizowany przez firmę Mecalog (obecnie włączona do Altair Engineering). Firma Mecalog, której sztandarowym produktem był pakiet elementów skończonych RADIOSS, była w tym czasie jednym z trzech głównych producentów oprogramowania do symulacji zderzeń pojazdów, obok Livermore Software Technology Corp – producenta programu LS-DYNA i ESI Group – producenta PAM-CRASH. Celem zorganizowanego przez doktora Vincenta Braibanta (kierownika firmy do spraw naukowych) projektu było teoretyczne opracowanie oraz implementacja w module programu RADIOSS efektywnych metod umożliwiających analizę stochastyczną oraz optymalizację konstrukcji samochodowych z uwagi na bezpieczeństwo pasażerów w czasie zderzenia. Moje zadania w ramach prac międzynarodowego zespołu dotyczyły przede wszystkim: studiów nad przydatnością metody bezpośredniego różniczkowania w analizie wrażliwości konstrukcji samochodowych podlegających zderzeniom, efektywnych metod symulacji losowych oraz statystycznych metod analizy eksperymentów numerycznych. Za moje główne osiągnięcie uznać należy udoskonalenie metod służących do konstruowania wielowymiarowych planów eksperymentów wykorzystujących koncepcję tzw. optymalnej łącińskiej hiperkostki. Planów tych używałem następnie w wielu nowych metodach analizy niezawodności i optymalizacji odpornościowej (ang. *robust optimization*), rozwijanych przeze mnie po powrocie do kraju. Zbudowany wspólnie z doktorem Mattiasem Liefvendahlem, doktorem Michałem Bulikiem i doktorem Christianem Wauquiez moduł M-Xplore programu RADIOSS był jednym z pierwszych tego typu modułów zintegrowanych z komercyjnymi pakietami MES.

Współpraca nawiązana podczas pobytu we Francji pozwoliła mi po powrocie do Polski, pod koniec 2003 roku, rozwijać dalej moje zainteresowania badawcze dotyczące analizy niezawodności oraz optymalizacji odpornościowej złożonych konstrukcji. Na początku 2004 roku Pracownia Niezawodności i Optymalizacji (PNiO) otrzymała zaproszenie od firmy Mecalog do wzięcia udziału w pięcioletnim projekcie europejskim APROSYS. Celem projektu był rozwój naukowy i technologiczny w dziedzinie bezpieczeństwa biernego samochodów i motocykli. W ramach projektu APROSYS sprawowałem merytoryczne kierownictwo nad pracami kilkusobowego zespołu składającego się przede wszystkim z pracowników PNiO. Zespół ten zajmował się głównie badaniem metod analizy niezawodności oraz optymalizacji odpornościowej pod kątem ich stosowania we wspomaganych przez symulacje komputerowe procesach projektowania i certyfikacji elementów konstrukcji pojazdów. Zaproponowane przeze mnie algorytmy bazowały na metodach symulacyjnych typu *descriptive sampling* oraz użyciu metody krigingu do aproksymacji niejawnych funkcji: awarii – w analizie niezawodności oraz funkcji celu i ograniczeń – w optymalizacji odpornościowej. Pozwoliły one na efektywną realizację zadań analizy niezawodności i optymalizacji odpornościowej w przypadku elementów pochłaniających energię zderzeń i testów zderzenia samochodu z fantomem przechodnia.

Jednym z celów, które postawiono sobie w pracy nad projektem APROSYS było zbudowanie oprogramowania do szeroko rozumianej analizy stochastycznej, a w szczególności: do symulacji losowych, analizy niezawodności oraz optymalizacji niezawodnościowej i odpornościowej. Powstały w IPPT w ramach projektu system STAND pozwala na łatwą integrację analizy stochastycznej z zewnętrznymi modułami obliczeniowymi, np. programami MES, i stanowi obecnie wspólną platformę rozwojową dla wszystkich członków PNiO [17].

Realizacja zadań projektu wymagała częstych podróży i bezpośrednich kontaktów pomiędzy partnerami. Pozwoliło mi to nawiązać bliską współpracę m.in. z naukowcami na Uniwersytecie w Cranfield w Anglii (profesor Kambiz Kayvantash) oraz na Politechnice w Grazu w Austrii (doktor Iztok Cigralic).

Równolegle z pracą w projekcie APROSYS, w latach 2004-2005 współpracowałem z firmą Imagine (obecnie LMS), producentem środowiska symulacyjnego AMESim – wiodącego programu do symulacji systemów 1-D złożonych z elementów hydraulicznych, pneumatycznych, elektrycznych i mechanicznych. Przygotowałem moduł programu AMESim do obliczania efektów głównych oraz interakcji zmiennych losowych w oparciu o wyniki eksperymentów numerycznych generowanych przez łańciskie hiperkostki. Opracowałem również procedurę do ważonej interpolacji czasowo-przestrzennej.

Ponadto w latach 2004-2005 nawiązałem współpracę z kierowaną przez doktora Jacka Marczyka firmą Ontonix zajmującą się analizą złożoności systemów. Brałem udział w opracowywaniu podstaw teoretycznych metodologii analizy złożoności opartej na modelowaniu informacji przy użyciu tzw. *fuzzy cognitive maps* jak również w stworzeniu pierwszych wersji programu OntoSpace, flagowego produktu firmy.

Począwszy od 2006 roku, w ramach projektu DIADYN nawiązałem współpracę z docentem Tomaszem Szolcem z IPPT, specjalistą w zakresie dynamiki urządzeń wirnikowych. Wspólnie z doktorem Piotrem Tazowskim i doktorem Jarosławem Knablem utworzyliśmy zespół badawczy zajmujący się metodami identyfikacji uszkodzeń wałów takich urządzeń na podstawie odpowiedniego monitorowania ich drgań jak również analizy bazy danych wyników eksperymentów numerycznych. Rezultaty przeprowadzonych badań zaprezentowano w publikacjach w renomowanych czasopismach naukowych oraz licznych wystąpieniach konferencyjnych.

W latach 2009-2010 zajmowałem się zagadnieniami optymalizacji odpornościowej wałów obrotowych maszyn wirnikowych. W 2010 roku praca [19], zaprezentowana została na prestiżowej konferencji IFToMM w Korei Płd., która poświęcona była problematyce dynamiki wałów. Przedstawiono w niej wyniki badań dotyczących optymalizacji odpornościowej wału sprężarki o losowych charakterystykach parametrów sztywności łożysk i resztkowych niewyważ. Praca ta uznana została za jedną z 10 najlepszych spośród prezentowanych na konferencji i ukaże się w 2011 roku w specjalnym wydaniu czasopisma Mechanical Systems and Signal Processing.

Od października 2009 roku jestem odpowiedzialny za realizację dwóch zadań w kierowanym przez docenta Piotra Kowalczyka projekcie NUMPRESS – *Zaawansowane metody numeryczne analizy, optymalizacji i niezawodności przemysłowych procesów tłoczenia blach*. Celem prowadzonych przez PNiO działań jest budowa programu o wysokich walorach użytkowych, umożliwiającego optymalizację odpornościową procesu tłoczenia blach.

W październiku 2010 roku w serii “Prace IPPT” opublikowałem rozprawę habilitacyjną zatytułowaną *Analiza niezawodności i optymalizacja odpornościowa złożonych konstrukcji i procesów*

technologicznych [14]. W rozprawie zawarłem moje osiągnięcia z ostatnich kilku lat pracy nad rozwojem algorytmów numerycznych służących szeroko rozumianej analizie stochastycznej złożonych konstrukcji jak również analizie niezawodności procesu głębokiego tłoczenia blach.

Zainteresowania i osiągnięcia naukowe

Optymalizacja niezawodnościowa konstrukcji prętowych

Problematyka optymalizacji niezawodnościowej konstrukcji prętowych była głównym tematem moich badań przez wiele lat. Poświęcona jej była także moja praca doktorska [12]. Ze względu na to, że zadanie optymalizacji niezawodnościowej charakteryzuje się dużą złożonością obliczeniową, poszukuje się rozwiązań, które pozwalają na redukcje kosztu obliczeń numerycznych. W swoich pracach, przygotowywanych głównie we współpracy z doktorem Siemaszką, skoncentrowałem się na zastosowaniu metod optymalizacji interaktywnej, zob. [8, 18]. Zaproponowane przeze mnie strategie realizacji zadania niezawodnościowej minimalizacji ciężaru konstrukcji prętowych narażonych na globalną i lokalną utratę stateczności pozwalały ograniczyć liczbę czasochłonnnych analiz niezawodności. Odpowiednio wczesna identyfikacja nieaktywnych ograniczeń nałożonych na prawdopodobieństwo awarii, a następnie aproksymacja ich wartości prowadziły w większości przypadków do poprawy efektywności rozwiązania oraz uniknięcia problemów ze zbieżnością algorytmu poszukiwania punktu projektowego dla dużych wartości wskaźnika niezawodności.

Naturalną modyfikacją sformułowania zadania optymalizacji niezawodnościowej konstrukcji prętowych było ograniczenie zbioru typów oraz wielkości przekrojów elementów do tych występujących w katalogach dostępnych przekrojów stalowych i aluminiowych. Z drugiej strony, pewna klasa zmiennych projektowych może przybierać wartości z ciągłych przedziałów, co prowadzi automatycznie do mieszanego dyskretno-ciągłego zadania optymalizacji niezawodnościowej. Wspólnie z mgr inż. Kolankiem zaproponowałem dwa algorytmy realizacji takiego problemu optymalizacji, kładąc szczególny nacisk na ich efektywność numeryczną [15, 16].

Za oryginalne podejście w kontekście optymalizacji odpornościowej uznać również należy uwzględnienie w wektorze zmiennych projektowych, oprócz zmiennych deterministycznych oraz wartości oczekiwanych zmiennych losowych, także zmiennych projektowych odpowiadającym wybranym miarom rozrzutu zmiennych losowych. Zmienne te odnoszą się zazwyczaj do jakości stosowanych materiałów oraz precyzji montażu. W przygotowanym we współpracy z docentem Dolińskim artykule [4] zaproponowałem postać funkcji celu zadania optymalizacji niezawodnościowej, która uwzględnia koszt zarówno jakości materiału jak i montażu.

W późniejszym okresie, w kontekście analizy niezawodności złożonych konstrukcji, gdzie funkcja graniczna zawiera trudny do probabilistycznego opisu szum, przedstawiłem nową metodę poprawy niezawodności wykorzystującą symulacje losowe i koncepcję optymalnej hiperkostki łacińskiej, zob. [13]. Metodę tę zaklasyfikować można również jako pewną przybliżoną technikę optymalizacji niezawodnościowej.

Niezawodność procesów głębokiego tłoczenia blach

Wspólnie z profesorem Kleiberem i doktorem Rojkiem sformułowałem problem analizy niezawodności procesu głębokiego tłoczenia blach. Funkcja awarii w postaci pęknięcia blachy zde-

finiowana została przy pomocy wykresów odkształceń granicznych w przestrzeni odkształceń głównych. Obliczenie prawdopodobieństwa uszkodzenia wytłoczki wymagało integracji programu do symulacji skończenie elementowych STAMPACK z modułem analizy niezawodności. Opublikowana w 2002 roku praca [7] była pierwszą, w której zaproponowano wykorzystanie komputerowych metod analizy niezawodności do oceny jakości procesu tłoczenia. Z uwagi na nieróżniczkowalny charakter funkcji awarii jako metodę analizy niezawodności przyjęto adaptacyjną metodę Monte Carlo. W związku z niemożliwością precyzyjnego wyznaczenia krzywej odkształceń granicznych zaproponowałem nową koncepcję rozmytego prawdopodobieństwa awarii.

Dalszy rozwój metod analizy niezawodności procesu tłoczenia miał na celu poprawę efektywności obliczeniowej poprzez aproksymację niejawną funkcji awarii przy pomocy ważonej regresji liniowej [6, 11].

Optymalizacja odpornościowa konstrukcji

Podczas pobytu we Francji w firmie Mecalog oraz uczestnicząc w projekcie APROSYS zainteresowałem się optymalizacją odpornościową konstrukcji. Tym co stanowi zasadniczą, koncepcyjną, różnicę pomiędzy optymalizacją odpornościową a optymalizacją niezawodnościową, są założenia dotyczące modelu stochastycznego. Rozwiązanie zadania optymalizacji niezawodnościowej silnie zależy od dokładnej znajomości funkcji łącznej gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennych losowych, ponieważ to właśnie informacja zawarta w ogonach tych rozkładów determinuje wielkość prawdopodobieństwa awarii. W przypadku optymalizacji odpornościowej problem nieprecyzyjnego określenia typów rozkładów prawdopodobieństwa nie jest jednak bardzo istotny. Koncepcja optymalizacji odpornościowej wydaje się być spójna z zazwyczaj bardzo uproszczonym modelem stochastycznym rozpatrywanego zagadnienia, natomiast w sformułowaniu optymalizacji niezawodnościowej model ten często w sposób sztuczny jest rozbudowywany.

Ze względu na powyższe, to właśnie rozwojowi sformułowań i metod optymalizacji odpornościowej poświęcono najwięcej uwagi w projekcie APROSYS dotyczącym rozwiązań zwiększających bezpieczeństwo pasażerów i przechodniów podczas wypadków komunikacyjnych. W raportach [2] i [3], sporządzanych w ramach projektu, zaproponowałem algorytmy optymalizacji odpornościowej wykorzystujące koncepcję symulacji typu *descriptive sampling* oraz strategię aproksymacji funkcji celu i ograniczeń odpornościowych przy pomocy metody krigingu. To właśnie metoda aproksymacji niejawną funkcji celu i ograniczeń jak też metoda szacowania momentów statystycznych tych funkcji decydują o numerycznej efektywności algorytmów optymalizacji odpornościowej, a co za tym idzie ich praktycznej przydatności. Dlatego też zagadnieniom tym poświęciłem dużo uwagi w swoich badaniach. Szczegółowe wskazówki dotyczące wszystkich aspektów realizacji zadania optymalizacji odpornościowej złożonych konstrukcji zawarłem w pracy habilitacyjnej [14]. Za oryginalny wkład do tej tematyki uznać należy zakres stosowania planów eksperymentów opartych na optymalnych łącińskich hiperkostek jak również użycie techniki krigingu w wersji aproksymacyjnej.

Jednym z ostatnich zastosowań opracowanych przeze mnie metod była odpornościowa minimalizacja amplitudy drgań wału sprężarki [19]. Model stochastyczny zadania, odnoszący się przede wszystkim do losowych wielkości resztkowych niewywag oraz parametrów sztywności i tłumienia łożysk, zawierał ponad 60 zmiennych losowych.

Nowoczesne metody symulacji losowych

Rozwój efektywnych algorytmów optymalizacji odpornościowej złożonych konstrukcji w naturalny sposób łączy się z wykorzystaniem technik symulacji losowych jako uniwersalnych metod szacowania wartości statystyk niejawnych funkcji celu i ograniczeń. Ze względu na wysoki koszt analizy mechanicznej, realizowanej najczęściej przy pomocy metody elementów skończonych, poszukuje się metod gwarantujących dostateczną dokładność estymacji przy możliwie jak najmniej licznych próbkach.

W moich badaniach skupiłem się na wykorzystaniu próbek generowanych przez łacińskie hiperkostki zarówno na potrzeby losowych symulacji jak też w celu tworzenia planów eksperymentów (danych przez tzw. optymalne hiperkostki) do budowy powierzchni odpowiedzi. Ponieważ utworzenie optymalnej łacińskiej hiperkostki (ang. *optimal Latin hypercube* - OLH), która pozwala równomiernie rozmieścić punkty eksperymentalne w przestrzeni wielowymiarowej, jest zadaniem o dużej złożoności obliczeniowej, dlatego wspólnie z doktorem Mattiasem Liefvendahlem udoskonaliłem algorytmy znajdowania takich planów eksperymentów. W pracy [9] wykazano ponadto, że tzw. kryterium sił prowadzi do bardziej równomiernego rozłożenia punktów hiperkostki niż, dominujące w literaturze, kryterium maksymalizacji minimalnej odległości między punktami.

Bardzo dobre właściwości planów OLH dotyczące równomiernego wypełniania danego obszaru punktami eksperymentalnymi wykorzystałem w oryginalnej metodzie szybkiej poprawy niezawodności [13]. Zaproponowałem tam także koncepcję zmodyfikowanego planu OLH - optymalnego jedynie na podprzestrzeni. Dużo uwagi poświęciłem analizie efektywności estymacji pierwszych dwóch momentów statystycznych jawnych i niejawnych funkcji losowych przy pomocy różnych technik symulacyjnych [14, 20].

Metoda powierzchni odpowiedzi w analizie niezawodności i optymalizacji

W analizie niezawodności oraz optymalizacji złożonych konstrukcji i procesów technologicznych zastępuje się zazwyczaj czasochłonną analizę skończenie elementową rzeczywistej konstrukcji operacjami na analitycznym metamodelu, skonstruowanym w oparciu o uprzednio zaplanowane eksperymenty numeryczne. Dąży się do takiego doboru metamodelu aby otrzymać jak najwierniejszą aproksymację oryginalnej odpowiedzi konstrukcji przy możliwie jak najmniejszej liczbie punktów eksperymentalnych.

W interesujących mnie zastosowaniach analizy niezawodności zaproponowałem użycie metody ważonej regresji liniowej do aproksymacji funkcji awarii w adaptacyjnej metodzie *importance sampling* [21]. Umożliwiło to poprawę zbieżności algorytmu poszukiwania punktu projektowego w zadaniach z nieróżniczkowalną i zaszumioną funkcją awarii.

Pokazałem, że zmodyfikowana aproksymująca metoda krigingu prowadzi do poprawy efektywności rozwiązania zadania optymalizacji odpornościowej [14, 19].

Analiza stochastyczna w zagadnieniach odporności zderzeniowej pojazdów

Dzięki udziałowi w projekcie APROSYS miałem możliwość prowadzić badania dotyczące zarówno metod symulacji losowych, analizy niezawodności jak też optymalizacji odpornościowej elementów konstrukcji samochodów podlegających zderzeniom [1–3, 13, 21].

Istotnym aspektem tej analizy jest probabilistyczne modelowanie uszkodzeń połączeń zgrzewanych. Biorąc pod uwagę ogromną liczbę połączeń zgrzewanych występujących w konstrukcjach samochodowych, zaproponowana przeze mnie metoda usuwania pewnej liczby losowo wybranych zgrzewów wydaje się być praktycznym rozwiązaniem, które pozwala uwzględnić losowe wady tych połączeń. W przypadku analizy niezawodności podejście to wymaga jednak odpowiednio dostosowanego algorytmu. W pracy [21], przygotowanej wspólnie z doktorem Tazowskim i doktorem Knablem, pokazałem, że użycie adaptacyjnego algorytmu symulacji losowych umożliwia efektywne oszacowanie prawdopodobieństwa awarii pomimo nieróżniczkowalności funkcji granicznej.

W pracy [1] przedstawiłem przykład jakościowej analizy zachowania zgniatanego elementu tylnej ramy pojazdu. Zastosowana metoda wykorzystywała prosty algorytm klasyfikacji wyników eksperymentów numerycznych generowanych przez plany OLH. Otrzymany analityczny wzór pozwalał na szybką przybliżoną klasyfikację różnych rozwiązań projektowych pod kątem zdolności elementu do absorbowania energii zderzenia.

Współpracując z doktorem Franckiem Delcroix z firmy Mecalog oraz doktorem Iztokiem Cigalicem z politechniki w Grazu przedstawiłem również zastosowanie sformułowania optymalizacji odpornościowej w zadaniu kalibracji parametrów modelu numerycznego używanego w komputerowej symulacji standardowych testów zderzeniowych [3]. Odpowiedni dobór parametrów modelu MES pozwolił na urealnienie wirtualnych modeli komputerowych poprzez zapewnienie zgodności z wynikami testów laboratoryjnych nie tylko odpowiedzi nominalnych, lecz również ich losowych rozrzutów.

Identyfikacja uszkodzeń wałów obrotowych urządzeń wirnikowych

Dzięki współpracy z docentem Szolcem zainteresowałem się zagadnieniami monitorowania stanu technicznego urządzeń wirnikowych, a w szczególności metodami identyfikacji uszkodzeń ich wałów. Uszkodzenie w postaci pęknięcia charakteryzowane było przede wszystkim przez jego położenie wzdłuż osi wału oraz względną głębokość. Zaproponowana przeze mnie metoda identyfikacji polegała na symulacyjnym wyznaczeniu bazy giętno-skrętno-wzdłużnych odpowiedzi drganiowych wału. Drgania te są wzajemnie sprzężone na skutek lokalnej anizotropii wywołanej pęknięciem. Poprzez porównanie obserwowanych odczytów czujników monitorujących pracę urządzenia z wynikami eksperymentów zgromadzonymi w bazie danych z dużą dokładnością wnioskować można o wystąpieniu uszkodzenia. Bardzo istotnym składnikiem strategii identyfikacji jest dobór funkcji gęstości prawdopodobieństwa parametrów pęknięcia. Odpowiednio wybrana funkcja umożliwia zagęszczenie bazy danych w obszarach odpowiadających zwiększonemu prawdopodobieństwu wystąpienia uszkodzenia.

Wyniki prac, prowadzonych wspólnie z doktorem Tazowskim i doktorem Knablem, opublikowane zostały w dwóch czasopismach z listy filadelfijskiej [22, 23] oraz zaprezentowane na kilku konferencjach międzynarodowych.

Programowanie obiektowe

Rozwiązywanie zagadnień analizy niezawodności oraz optymalizacji odpornościowej lub niezawodnościowej, wymaga stworzenia wyspecjalizowanego oprogramowania łączącego zarówno efektywną implementację algorytmów, jak i walory użytkowe. Oprogramowanie takie musi

umożliwić łatwą komunikację z zewnętrznymi modułami obliczeniowymi (najczęściej z programami MES), a także uruchamianie analiz na komputerach o architekturze wieloprocesorowej bądź klastrach obliczeniowych.

Duża liczba i zróżnicowanie koniecznych modułów sprawia, że tworzenie zaawansowanego programu do szeroko rozumianej analizy stochastycznej jest poważnym wyzwaniem programistycznym. Architektura kodu zapewnić powinna możliwość jednoczesnego rozwijania go przez wielu programistów oraz łatwość utrzymania i wprowadzania modyfikacji. Odpowiednią platformą do realizacji tych celów jest programowanie zorientowane obiektowo.

Obiektowo zorientowaną architekturę posiada również program STAND (*STochastic ANalysis and Design*), który od 2004 roku rozwijany jest pod moim kierownictwem w Pracowni Niezawodności i Optymalizacji IPPT PAN. Kod ten, będąc w istocie zbiorem bibliotek w języku C++ grupujących klasy danych oraz algorytmy, zaprojektowany został jako wspólna platforma programowa służąca do implementacji oraz testowania metod analizy stochastycznej. W obecnej wersji programu zaimplementowano wiele standardowych jak również oryginalnych rozwiązań analizy niezawodności i optymalizacji odpornościowej konstrukcji. Ponadto, STAND wyposażony jest w mechanizmy interaktywnego definiowania zadania, jak również automatycznej integracji z zewnętrznymi modułami obliczeniowymi [14, 17].

Rozprawa habilitacyjna [14]

Jako najważniejsze elementy oryginalne rozprawy można wymienić:

- Teoretyczne opracowanie oraz komputerową implementację szeregu metod umożliwiających szeroko pojętą analizę stochastyczną złożonych problemów mechaniki konstrukcji.
- Zaproponowanie trzech strategii rozwiązania zadania optymalizacji odpornościowej. Są to:
 - podstawowa strategia aproksymacji,
 - strategia aproksymacji statystyk,
 - strategia aproksymacji funkcji celu i ograniczeń odpornościowych.

Wszystkie trzy strategie zostały zaimplementowane w tworzonej przeze mnie bibliotece optymalizacyjnej programu STAND. Na podstawie licznych testów można stwierdzić, że strategia aproksymacji funkcji celu i ograniczeń odpornościowych jest rozwiązaniem najbardziej efektywnym.

- Zastosowanie zmodyfikowanej wersji krigingu w metodzie realizacji zadania optymalizacji odpornościowej do aproksymacji wartości momentów statystycznych funkcji celu i ograniczeń.
- Przeprowadzenie szczegółowej analizy metod symulacyjnych wykorzystujących plany OLH. Wykazano, że próbki generowane przez hiperkostki łacińskie, są lepszym rozwiązaniem niż czysto losowe próbki w symulacjach Monte Carlo. Próbkę utworzoną przez OLH warto stosować szczególnie wtedy, gdy ze względu na koszt nie można pozwolić sobie na otrzymanie wartości rozważanej funkcji dla zbyt wielu realizacji zmiennych losowych.

- Pokazanie, że zarówno algorytm szybkiej poprawy niezawodności, jak też zmodyfikowany przeze mnie adaptacyjny algorytm symulacji losowych, nie są wrażliwe na wpływ umiarkowanego szumu numerycznego.
- Stworzenie wielu modułów programu STAND, a w szczególności modułów: optymalizacji odpornościowej, powierzchni odpowiedzi, zaawansowanych metod analizy niezawodności oraz symulacji losowych wykorzystujących koncepcję łańciskich hiperkostek.

Część wyników zawartych w pracy była publikowana wcześniej w artykułach [7, 9, 13, 17, 20, 21]. Oświadczenia współautorów tych prac stanowią załącznik dokumentacji habilitacyjnej.

Publikacje

Opublikowałem 14 artykułów w recenzowanych czasopismach naukowych (12 po uzyskaniu stopnia naukowego doktora), w tym 8 z listy filadelfijskiej. Moja rozprawa doktorska wydana została w serii "Prace IPPT". Jestem także współautorem 30 referatów (z tego około 10 recenzowanych) opublikowanych w materiałach konferencji krajowych i zagranicznych oraz monografiach.

Udział w projektach badawczych, wyjazdy i współpraca międzynarodowa

Aktywnie uczestniczyłem i nadal uczestniczę w grantach i projektach badawczych realizowanych w IPPT PAN. Lista tych projektów jest załączona na końcu niniejszego opracowania.

- Jako wykonawca brałem udział w realizacji 11 grantów KBN (poz. 1–11) oraz jednej krajowej sieci doskonałości (poz. 17).
- Obecnie pracuję w czteroletnim projekcie NUMPRESS (poz. 16) realizowanym w ramach Programu Operacyjnego: Innowacyjna Gospodarka.
- Byłem wykonawcą w dwóch projektach badawczych finansowanych przez Unię Europejską (poz. 14, 15) oraz w dwóch europejskich centrach doskonałości (poz. 18, 19).
- Jako kierownik realizowałem również zadania o charakterze badawczym w projektach finansowanych przez firmę IMAGINE S.A. (obecnie LMS) (poz. 12, 13).

W związku z realizacją projektów europejskich współpracowałem z następującymi ośrodkami zagranicznymi:

- Politechnika w Monachium i firma RCP, prof. Rüdiger Rackwitz (projekt SAFERELNET),
- Uniwersytet w Aalborg, Dania, prof. John Sørensen (projekt SAFERELNET),
- Politechnika w Graz, Austria, dr Iztok Cigralic (projekt APROSYS),
- Uniwersytet w Cranfield, Anglia, prof. Kambiz Kayvantash (projekt APROSYS),
- Firma Mecalog (obecnie Altair), dr Franck Delcroix (projekt APROSYS).

Odbyłem 2-letni staż po doktoracie w firmie Mecalog w Antony we Francji. Pośrednim wynikiem tego pobytu był udział IPPT w pięcioletnim projekcie badawczym APROSYS, a także zadania badawcze zlecane Pracowni Niezawodności i Optymalizacji przez firmę IMAGINE S.A. W ramach współpracy pomiędzy PAN, a Politechniką w Budapeszcie (dr Janos Logo) w 2008 roku przygotowano wspólne wystąpienie na konferencji w Bremen w Niemczech nt. niezawodnościowo wspomaganey analizy stanów granicznych ram stalowych [10].

Działalność dydaktyczna i organizacyjna

Byłem członkiem Komitetu Organizacyjnego konferencji 36th Solid Mechanics Conference SolMech 2008. Brałem również udział w organizacji konferencji: *Computational aspects of nonlinear structural systems with large rigid body motion* - NATO Advanced Research Workshop w Pułtusk, 2-7 czerwca, 2000 roku.

Podczas pobytu w 1996 roku w International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) na Politechnice Katalońskiej w Barcelonie przygotowałem polską wersję programów edukacyjnych 'Ed-beams' i 'Ed-frames' do nauki mechaniki budowli za pomocą metody przemieszczeń (metody elementów skończonych dla ram i belek). Program ten zaprezentowałem następnie na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.

Obecnie sprawuję opiekę naukową nad pracą doktorską mgr inż. Rafała Lasoty poświęconą optymalizacji odpornościowej procesów tłoczenia blach.

Wykaz moich prac cytowanych w tekście

- [1] M. Bulik, M. Liefvendahl, R. Stocki, C. Wauquiez. Stochastic simulation for crashworthiness. *Advances in Engineering Software*, 35:791–803, 2004.
- [2] F. Delcroix, T. Bekkour, R. Stocki. Report on robust optimization and ADVISER extensions. Report no. D734A, EC FP6 Project APROSYS, 2008.
- [3] M. Diez, R. Pupini, F. Delcroix, R. Stocki, I. Ciglaric. Complete demonstrators in various numerical codes along with procedural report for virtual testing implementation in pedestrian impacts. Report no. D742B, EC FP6 Project APROSYS, 2009.
- [4] K. Doliński, R. Stocki. Reliability-based structural optimization accounting for manufacturing and material quality. *Engineering Transactions*, 4:623–636, 2001.
- [5] W. Gilewski, R. Stocki. High precision finite elements for axisymmetric shells, theory and computer program. In *proc. of XII Polish Conference on Computer Methods in Mechanics, May 9–13, 1995, Warsaw-Zegrze, Poland*, p. 124–125, 1995.
- [6] M. Kleiber, J. Knabel, J. Rojek, R. Stocki. Reliability-based analysis of large deformations in metal-forming operations. In C. Miehe, editor, *Proc. of IUTAM Symposium on Computational Mechanics of Solid Materials at Large Strains, 20-24 August 2001, Stuttgart, Germany*, p. 435–444. Kluwer Academic Publishers, 2003.

- [7] M. Kleiber, J. Rojek, R. Stocki. Reliability assessment of sheet metal forming operations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191:4511–4532, 2002.
- [8] M. Kleiber, A. Siemaszko, R. Stocki. Interactive stability-oriented reliability-based design optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 168(1–4):243–253, 1999.
- [9] M. Liefvendahl, R. Stocki. A study on algorithms for optimization of latin hypercubes. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 136(9):3231–3247, 2006.
- [10] J. Logo, A. Vasarhelyi, M.M. Rad, R. Stocki. Reliability based limit analysis of steel frames with limited residual strain energy capacity. In *proc. of 79th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, 31 March-4 April 2008, Bremen, Germany*, volume 8, p. 10041–10044. PAMM, 2009.
- [11] J. Rojek, M. Kleiber, A. Piela, R. Stocki, J. Knabel. Deterministic and stochastic analysis of failure in sheet metal forming operations. *Steel Grips - Journal of Steel and Related Materials*, 2:29–34, 2004.
- [12] R. Stocki. *Optymalizacja niezawodnościowa konstrukcji prętowych w zakresie dużych przemieszczeń - teoria i program komputerowy*. Prace IPPT - IFTR Reports, 13/1999.
- [13] R. Stocki. A method to improve design reliability using optimal latin hypercube sampling. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 12:393–411, 2005.
- [14] R. Stocki. *Analiza niezawodności i optymalizacja odpornościowa złożonych konstrukcji i procesów technologicznych*. Prace IPPT - IFTR Reports, 2/2010.
- [15] R. Stocki, K. Kolanek, S. Jendo, M. Kleiber. Computational aspects of discrete reliability-based optimization of structural systems. In *Proc. ECCM-2001 European Conference on Computational Mechanics, Cracow, Poland, June 26-29, 2001*. na CD.
- [16] R. Stocki, K. Kolanek, S. Jendo, M. Kleiber. Study on discrete optimization techniques in reliability-based optimization of truss structures. *Computers and Structures*, 79(22–25):2235–2247, 2001.
- [17] R. Stocki, K. Kolanek, J. Knabel, P. Tazowski. FE based structural reliability analysis using STAND environment. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 16:35–58, 2009.
- [18] R. Stocki, A. Siemaszko, M. Kleiber. Interactive methodology for reliability-based structural design and optimization. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 6:39–62, 1999.
- [19] R. Stocki, T. Szolc, P. Tazowski, J. Knabel. Robust design optimization of the vibrating rotor shaft system subjected to rubbing constrains. In *Proc. 8th IFToMM International Conference on Rotordynamics, Seoul, Korea, 12–15 September*, p. 1022–1029, 2010.

- [20] R. Stocki, P. Tazowski, M. Kleiber. Efficient sampling techniques for stochastic simulation of structural systems. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 14:127–140, 2007.
- [21] R. Stocki, P. Tazowski, J. Knabel. Reliability analysis of a crashed thin-walled s-rail accounting for random spot weld failures. *International Journal of Crashworthiness*, 13:693–706, 2008.
- [22] T. Szolc, P. Tazowski, J. Knabel, R. Stocki. Nonlinear and parametric coupled vibrations of the rotor-shaft system as fault identification symptom using stochastic methods. *Nonlinear Dynamics*, 57:533–557, 2009.
- [23] T. Szolc, P. Tazowski, R. Stocki, J. Knabel. Damage identification in vibrating rotor-shaft systems by efficient sampling approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23:1615–1633, 2009.

Lista projektów, grantów KBN i europejskich

1. *Nowe metody analizy wrażliwości, optymalizacji i niezawodności złożonych nieliniowych układów konstrukcyjnych.* Grant KBN 7 T07A 018 10, czas trwania 1.01.1996 – 31.12.1998, kierownik projektu: prof. Michał Kleiber.
2. *Nowe metody polioptymalizacji złożonych układów konstrukcyjnych przy zastosowaniu metod dekompozycji i systemów ekspertowych.* Grant KBN 7 T07A 052 12, czas trwania 1.01.1997 – 31.12.1999, kierownik projektu: prof. Stefan Jendo.
3. *Niezawodnościowa optymalizacja konstrukcji prętowych w zakresie dużych przemieszczeń: teoria i program komputerowy.* Grant KBN 7 T07A 035 14 - grant promotorski, czas trwania 5.05.1997 – 23.12.1999, kierownik projektu: prof. Michał Kleiber.
4. *Metodyka niezawodnościowego projektowania i optymalizacji konstrukcji nieliniowych.* Grant KBN Nr 7 T07A 067 12, czas trwania 1.05.1997 – 31.07.2000, kierownik projektu: dr hab. Krzysztof Doliński.
5. *Zastosowania nowych metod analizy wrażliwości do optymalizacji, sterowania i oceny niezawodności nieliniowych układów konstrukcyjnych obciążonych statycznie i dynamicznie.* Grant KBN 7 T07A 025 16, czas trwania 1.01.1999 – 31.12.2001, kierownik projektu: prof. Michał Kleiber.
6. *Zastosowania nowych metod optymalizacji dyskretnej do projektowania złożonych układów konstrukcyjnych przy wykorzystaniu nowoczesnych technik komputerowych.* Grant KBN 7 T07A 045 18, czas trwania 1.01.2000 – 31.12.2002, kierownik projektu: prof. Stefan Jendo.
7. *Zastosowania nowych metod niezawodności i optymalizacji dyskretnej w projektowaniu złożonych układów konstrukcyjnych.* Grant KBN 5 T07A 018 24, czas trwania 1.01.2000 – 31.10.2002, kierownik projektu: prof. Stefan Jendo.

8. *Rozwijanie i integrowanie nowych metod optymalizacji, niezawodności i sterowania w projektowaniu nieliniowych układów konstrukcyjnych obciążonych statycznie i dynamicznie.* Grant KBN 5 T07A 052 22, czas trwania 1.03.2002 – 28.02.2005, kierownik projektu: prof. Jan Holnicki-Szulc.
9. *DIADYN, Zintegrowany dynamiczny system oceny ryzyka, diagnostyki oraz sterowania dla obiektów i procesów technicznych.* Grant KBN PBZ-KBN-105/T10/2003, czas trwania 2005 – 2008, kierownik projektu: prof. Jan Kiciński.
10. *Nowe metody projektowania bezpiecznych konstrukcji, uwzględniające identyfikację zagrożeń i aktywną adaptację w stanach krytycznych.* Grant MNiSW 3T11F00930, czas trwania 2006 – 2009, kierownik projektu: prof. Jan Holnicki-Szulc.
11. *Nowoczesne metody komputerowej analizy stochastycznej w zastosowaniu do oceny bezpieczeństwa konstrukcji.* Grant MNiSW N519 010 31/1601, czas trwania 2006 – 2009, kierownik projektu: prof. Michał Kleiber.
12. *Opracowanie programu komputerowego przeznaczonego do generowania planów eksperymentów z użyciem hiperkostek łacińskich oraz przeprowadzania efektywnych symulacji Monte Carlo.* jednostka finansująca: IMAGINE S.A., czas trwania 1.06.2005 – 31.09.2005, kierownik pracy dr Rafał Stocki.
13. *Opracowania fragmentów programu komputerowego do ważonej interpolacji czasowo-przestrzennej danych.* jednostka finansująca: IMAGINE S.A., czas trwania 1.06.2006 – 30.07.2006, kierownik pracy dr Rafał Stocki.
14. *APROSYS, Integrated Project on Advanced Protection Systems.* FP6-PLT-506503, jednostka finansująca: Komisja Europejska, czas trwania: 1.04.2004 – 31.03.2009, koordynator: TNO, kierownik zespołu IPPT PAN: prof. Stefan Jendo.
15. *PROHIPP, New design and manufacturing processes for high pressure fluid power products.* NMP2-CT-2004-505466, FP6-NMP, jednostka finansująca: Komisja Europejska, czas trwania: 01.06.2004–31.05.2008, koordynator: Pedro Roquet S.A., kierownik zespołu IPPT PAN: dr Jerzy Rojek.
16. *NUMPRESS, Zaawansowane metody numeryczne analizy, optymalizacji i niezawodności przemysłowych procesów tłoczenia blach.* POIG.01.03.01-14-209/09, jednostka finansująca: Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego, czas trwania: 1.10.2009 – 30.09.2013, kierownik projektu: dr hab. Piotr Kowalczyk.
17. *Centrum doskonałości systemów ciśnieniowych o ekstremalnych warunkach pracy.* Sieć doskonałości, jednostka finansująca KBN, kierownik centrum: prof. Michał Kleiber.
18. *KMM-NoE, Knowledge-based Multicomponent Materials for Durable and Safe Performance.* Sieć doskonałości, jednostka finansująca: Komisja Europejska, czas trwania: 1.11.2004 – 31.10.2008, koordynator: IPPT PAN.

19. *SAFERELNET Thematic Network on Safety and Reliability of Industrial Products, Systems and Structures*. Sieć doskonałości, jednostka finansująca: Komisja Europejska, czas trwania: 1.11.2001 – 31.10.2005, koordynator: Instituto Superior Técnico, Lizbona.