

Gliwice, 15 kwietnia 2024

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Nieradki  
pt. „Zastosowanie filtracji Monte Carlo do korekcji ujemnych współczynników strat  
w Eksperymentalnej Statystycznej Analizie Energii”  
w dziedzinie **nauk technicznych**, w dyscyplinie automatyka, elektronika,  
elektrotechnika i technologie kosmiczne

### 1. Podstawa formalna

Praca została wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Dziedzica, zgodnie z pismem z dnia 12 lutego 2024 r.

### 2. Wprowadzenie

Obecnie bardzo popularny i często wykorzystywany jest proces tworzenia wirtualnej wersji produktu lub systemu przed jego fizyczną realizacją. Postępowanie takie, zwane wirtualnym prototypowaniem, pozwala na powstanie bardziej dopracowanego produktu dzięki możliwości eksperymentowania z wieloma jego parametrami jeszcze na etapie projektowania. Przyczynia się także do skrócenia czasu potrzebnego do stworzenia produktu lub systemu i obniżenia kosztów jego rozwoju. Jest ponadto przyjazne dla środowiska, między innymi dzięki możliwości uniknięcia odpadów w postaci nieudanych prototypów. Wirtualne prototypowanie wykorzystywane jest między innymi podczas projektowania produktów, które są źródłami hałasu i wibracji, w celu zmniejszenia źródeł hałasu i drgań oraz optymalizacji jego przenoszenia przez elementy produktu (np. obudowy), co jest kolejnym przykładem pozytywnego oddziaływania na środowisko. W przypadku tak postawionego celu wirtualnego prototypowania często wykorzystuje się metodę statystycznej analizy energii, zwaną w języku angielskim *statistical energy analysis* (SEA), która jest tematem recenzowanej pracy. Należy zatem stwierdzić, że tematyka podejmowana w pracy doktorskiej należy do tematów ważnych, o szerokim polu zastosowań, obejmującym m.in. branżę budowlaną, motoryzacyjną, lotniczą, kolejową, okrętową, a także branżę AGD. Mieści się ona dobrze w zakresie dyscypliny *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*.

### 3. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca ma klasyczny układ monografii. Rozpoczyna się ona od streszczeń w języku polskim i angielskim, po których następują kolejno: spis treści, spis rysunków, spis tablic i lista akronimów. Zasadnicza część pracy rozpoczyna się od rozdziału „Wprowadzenie”, w którym Autor przedstawia tezę pracy, motywację do zajęcia się tematem, szczegółowe cele pracy oraz omawia krótko strukturę pracy. Doktorant przedstawia jedną tezę pracy, która dotyczy odpowiedniego doboru rozkładu zaburzeń wprowadzanych do macierzy pomiarowej, który pozwala na uzyskanie wysokiej skuteczności filtracji Monte Carlo zastosowanej do statystycznej analizy (rozpływu) energii (ang. *Statistical Energy Analysis, SEA*). Jako cele szczegółowe Doktorant stawia udzielenie odpowiedzi na trzy pytania, przedstawione w tej części pracy.

Kolejny rozdział pracy dotyczy przeglądu literatury przedmiotu oraz podstaw teoretycznych i eksperymentalnych samej metody SEA. Przegląd literatury jest dosyć obszerny, wyczerpujący i zajmuje sześć stron. Omawiając podstawy metody SEA Autor przedstawia bilans rozpływu energii wibroakustycznej w złożonych systemach, w których można wyróżnić podsystemy połączone złączami o określonych właściwościach. Daje do podstawy do zbudowania macierzy strat energii, w której wszystkie elementy poza przekątną główną są ujemne. Dalej Doktorant przedstawia założenia upraszczające, które stoją u podstawy metody SEA. W kolejnym podrozdziale omówiona została metoda eksperymentalna SEA, która pozwala wyliczyć na podstawie pomiarów macierz będącą odwrotnością macierzy rozpływu energii. Ponieważ jednak z uwagi na występujące zakłócenia pomiarowe, odwrotność tej macierzy nie spełnia założeń macierzy energii, stosuje się metodę filtracji Monte Carlo (MCF, *Monte Carlo Filtering*) w celu sztucznego zaburzenia macierzy pomiarowej tak, aby jej odwrotność mogła być uznana za macierz rozpływu energii. Wszystkie te szczegóły Autor przedstawia w sposób niezwykle klarowny, łatwy do zrozumienia przez inżyniera.

Trzeci rozdział, zatytułowany „Teoria ESA”, stanowi już osobisty dorobek Autora dysertacji, bazujący na wcześniejszych pracach dotyczących rozszerzenia obszaru poszukiwań macierzy odwrotnej (ang. *Expansion of the Search Area*), lecz dodatkowo proponujący formalny opis matematyczny oraz ulepszenia dotychczas istniejących metod. Rozdział ten omawia błędy występujące podczas stosowania metody ESA, dwa sposoby ich minimalizacji oraz kryterium oparte na całkowitym współczynniku strat (ang. *Total Loss Factor, TLF*).

Czwarty rozdział pracy rozpoczyna jej część związaną z weryfikacją eksperymentalną przedstawionych wyników teoretycznych. Autor rozpoczyna go od opisu badanych systemów o różnej złożoności (od 1 do 4 podsystemów) oraz sposobów ich połączeń. Następnie Doktorant opisuje stanowisko pomiarowe umożliwiające wykonanie pomiarów dzięki zastosowaniu akcelerometrów, systemu akwizycji danych, młotka modalnego oraz innego osprzętu. W ostatniej części opisany został sam proces zbierania pomiarów.

Piąty, przedostatni rozdział dysertacji to analiza otrzymanych wyników pomiarowych. Autor rozpoczyna ją od sprawdzenia wyników stosowania metody filtracji Monte Carlo w zależności od stopnia spełnienia założeń metody SEA. Rozpatruje wpieryw przypadek pojedynczej płyty, a następnie system złożony z dwóch płyt z różnymi rodzajami połączeń. Porównuje wyniki badań eksperymentalnych z symulacjami odpowiednich systemów. Dalej Doktorant wykorzystuje zaproponowany sposób rozszerzania obszaru poszukiwań dla wyselekcjonowanych systemów. Pokazuje przy tym dużą przydatność zaproponowanej metody. Posumowaniem tego rozdziału jest tabela zbiorcza, pozwalająca na ocenę działania metod dla wszystkich badanych systemów.



Ostatnim rozdziałem pracy jest podsumowanie, przedstawiające syntetyczny opis osiągnięć Doktoranta, dalsze możliwe kierunki pracy w zakresie objętych pracą, oraz kilka uwag końcowych.

Całość pracy uzupełnia bibliografia, cytująca sto pozycji literaturowych, co jest wartością normalną dla tego typu pracy. Wśród nich znajdują się trzy pozycje będące pracami współautorskimi Doktoranta i jego Promotora.

Układ pracy jest formalnie poprawny, jest ona napisana poprawną polszczyzną i zawiera jedynie niewielką liczbę pomyłek edytorskich. Redakcyjna strona pracy oraz jej estetyka są bez zarzutu.

#### 4. Najważniejsze osiągnięcia pracy

Do najważniejszych osiągnięć pracy można z pewnością zaliczyć samą ideę rozszerzania macierzy przyrostów energii wyłącznie na głównej przekątnej. Rozwiązanie to jest w pełni uzasadnione faktem, że zastosowanie jednorodnego rozszerzania nie będzie wystarczające w przypadku, gdy elementy poza główną przekątną są zbyt duże.

Bardzo istotnym elementem pracy jest zauważenie i zbadanie mechanizmu powstawania asymetrii w wygenerowanych populacjach macierzy  $\{G_s\}$ . Asymetria ta ma bardzo duże znaczenie praktyczne, prowadzi bowiem do zaniżenia wyznaczonych wartości współczynników strat. W pracy Doktorant przedstawił kompletną analizę tego zjawiska, wraz ze zgrabnym opisem matematycznym, w którym wprowadził współczynnik asymetrii populacji macierzy energii. Dalej Autor przebadał w sposób eksperymentalny zależność tego współczynnika od wartości czynnika skalującego macierz przyrostów energii, uzyskując jednoznaczne i łatwe do interpretacji wyniki. Pozwoliło to na wskazanie praktycznego sposobu doboru współczynnika skalującego.

Jednak za najważniejsze osiągnięcie pracy uważam przedstawione przez Doktoranta metody wymuszania symetrii populacji macierzy energii. Pierwsza z tych metod bazuje na eliminacji z obliczeń tych macierzy zaburzeń, które nie mają swoich odpowiedników po drugiej stronie wartości średniej rozkładu losowanych wartości zaburzających. Autor obrazowo nazywa tę metodę metodą „odrzućcia macierzy wpadających w ogon rozkładu normalnego”. Druga z metod polega na zmianie rozkładu wartości zaburzających z normalnego na logarytmicznie normalny. Obydwie metody pozwalają wyeliminować asymetrię zbioru wygenerowanych populacji macierzy.

Kolejnym, ważnym elementem pracy jest wykonanie badań eksperymentalnych. Warto podkreślić ten aspekt, który jest niezwykle ważny w praktyce inżynierskiej. Doktorant zaprojektował i przeprowadził serię badań na wybranych przez siebie, kilku systemach złożonych z podstawowych struktur (płyty, belki) połączonych złączami różnych typów. Wymagało to także skonstruowania odpowiedniego stanowiska pomiarowego, wyposażonego w akcelerometry, młotek modalny, system cyfrowej akwizycji danych, elementy konstrukcyjne oraz wyposażenie dodatkowe. Dobór miejsc montażu akcelerometrów oraz wprowadzania pobudzenia również musiał zostać odpowiednio przygotowany i przeprowadzony. Tylko takie skrupulatne podejście mogło zostać zwieńczone zebraniem danych użytecznych do potwierdzenia opracowanych metod teoretycznych.

Finalnym elementem dorobku wykazanego w przedstawionej do recenzji pracy jest analiza uzyskanych wyników badań, zawarta w piątym rozdziale pracy. Rozdział ten uważam za wyjątkowo dobrze opracowany; pokazuje on wiele nowatorskich aspektów i wyników wynikających z przeprowadzonych prac. Autor poddaje badaniom za pomocą analizy SEM pojedynczą płytę oraz system złożony z dwóch

plyt połączonych złączami spawanymi, punktowymi (nitowanymi, spawanymi i śrubowymi) oraz połączonych gumą (wprowadzającą silne tłumienie). Otrzymane wyniki pomiarowe Doktorant konfrontuje z wynikami symulacji FEM w COMSOLu i symulacji SEA w VaOne 2021. Wyniki te dowodzą dużej wagi i konieczności przeprowadzania badań eksperymentalnych w przypadku bardziej złożonych systemów. Autor udziela także odpowiedzi na ile istotne jest spełnienie założeń teoretycznych, stojących u podstaw metody SEA. Wszystkie te aspekty są omówione wyjątkowo dobrze, w sposób zasługujący na szczególne uznanie.

Podsumowując powyższe można napisać, że osiągnięciem Doktoranta jest przejście całej ścieżki cechującej wysokiej klasy badania teoretyczne z aspektem inżynierskim: od pomysłu bazującego na znajomości niedoskonałości istniejących metod, przez analizę, prace badawcze i ich opis teoretyczny, a następnie weryfikację eksperymentalną.

## 5. Uwagi krytyczne i pytania

Uważam, że błędem jest zawarcie w manuskrypcie tylko jednej tezy. Sama praca dowodzi co najmniej dwie: tę przytoczoną w punkcie 1.1, oraz te dotyczące dokładności metody SEM w zależności od stopnia spełnienia założeń.

Największej krytyce należy jednak poddać przedstawiony bez wystarczającej dyskusji pomysł rozszerzania obszaru poszukiwań, nazwany DESA, a wyrażony równaniem (3.4). W pracy nie widzę bowiem uzasadnienia dla użycia wartości 1 do elementów poza główną przekątną. Moim zdaniem można zastosować dwie *dowolne* wartości: jedną dla elementów na przekątnej, a drugą poza. Aby rozważania miały odpowiedni stopień ogólności, należało by przebadać wszystkie kombinacje przypadków dla tych wartości mniejszych od 1, równych jedności i większych od 1. Jeżeli natomiast takie badania były przeprowadzone, należało to w pracy opisać.

## 6. Uwagi szczegółowe i pytania

Poniżej przedstawiam listę uwag szczegółowych i pytań, które nasunęły mi się podczas lektury pracy.

1. Za niefortunne uważam użyty w pracy termin „fale giętne”, będący tłumaczeniem angielskiego terminu „bending waves”. Wiem, że taki termin w literaturze polskiej występuje, lecz uważam, że lepszym tłumaczeniem jest w tym przypadku zwrot „fale zginające”.
2. W dobie coraz większego nacisku na otwartość i powtarzalność wyników badań, pewien niedosyt budzi brak publikacji danych pomiarowych. Jeżeli dane te stanowią własność intelektualną firmy, w której Doktorant pracuje, a której firma nie chce ujawniać, należało to w pracy zaznaczyć.
3. Drobnym mankamentem jest brak dokładnego opisu toru pomiarowego, w szczególności sposobu wzorcowania używanych akcelerometrów.



## 7. Ocena końcowa

Warto zauważyć zawartą w recenzji niewielką liczbę uwag krytycznych, co nie zawsze ma miejsce w przypadku pracy doktorskich, a zwłaszcza w przypadku doktoratów wdrożeniowych. Świadczy to o wysokim poziomie pracy, w której mgr inż. Paweł Nieradka trafnie zdefiniował zadanie badawcze, które nie zostało jeszcze w sposób zadowalający rozwiązane, i sformułował tezę, że rozwiązanie tego zagadnienia można znacznie poprawić stosując odpowiedni sposób rozszerzania obszaru poszukiwań. Sposobem udowodnienia postawionej tezy byłoby przeprowadzenie badań eksperymentalnych, a następnie właściwa interpretacja ich wyników. W moim przekonaniu postawiona teza pracy została przez Autora udowodniona. Pracę cechuje wysoka przydatność dla nauk inżynierijno-technicznych z uwagi na jej wysoką przydatność w rzeczywistych zastosowaniach. W sposób jednoznaczny dowodzi to, że kandydat posiada wiedzę z zakresu objętego dyscypliną *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*, oraz ma umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Uważam, że przedłożona rozprawa w pełni spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i może stanowić podstawę nadania stopnia doktora nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Z uwagi na wysoki poziom pracy wnioskuję o jej wyróżnienie.

Z wyrazami szacunku

*Dawid Bismar*

