



Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
inicjatywa doskonałości

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Dr hab. inż.

Andrzej Katunin

Profesor uczelni

Gliwice, dn. 1.09.2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Kaleeswarana Balasubramaniam**

pt. „**Damage localization based on piezoelectric and fiber Bragg grating sensed guided waves**”

1. Ogólna charakterystyka pracy

Rozwój systemów monitorowania stanu konstrukcji (SHM) w świetle rosnących wymagań stanowi kluczowy kierunek badań przy zapewnieniu integralności i niezawodności współczesnych konstrukcji inżynierskich. Obecnie zastosowanie systemów SHM jest wciąż ograniczone, w dużej mierze ze względu na kosztowność tych systemów oraz szybkość przetwarzania pozyskiwanych danych pomiarowych. Zatem jednym z istotnych problemów wdrażania takich systemów jest minimalizacja obu wymienionych czynników. Obok tych czynników, szczególną uwagę poświęca się udoskonaleniu systemów SHM pod względem wrażliwości na różnego rodzaju uszkodzenia oraz dokładności ich lokalizacji i identyfikacji w strukturach wykonywanych z różnych materiałów. W swojej rozprawie doktorskiej Autor nawiązuje do wszystkich tych czynników, zmierzając w kierunku opracowania efektywnych i niskokosztowych rozwiązań dla SHM. W tym kluczu została określona tematyka pracy doktorskiej Autora, która obejmuje opracowanie metod detekcji, lokalizacji i kwantyfikacji uszkodzeń z wykorzystaniem kombinacji nowoczesnych technik pomiarowych oraz efektywnych algorytmów przetwarzania pozyskiwanych wyników badań, skierowanych przede wszystkim na uproszczenie i obniżenie czasu przeprowadzenia badań przy zachowaniu wysokiej efektywności identyfikacji uszkodzeń. Podjęta w rozprawie tematyka dobrze wpisuje się w aktualne trendy badań naukowych w zakresie monitorowania struktur z wykorzystaniem technik, opierających się na zjawiskach falowych w materiałach. Opracowana metodyka stanowi podstawę do opracowania rozwiązań, mających wysoki potencjał wdrożeniowy przy monitorowaniu elementów środków transportu oraz konstrukcji budowlanych.

Rozprawa została przygotowana w języku angielskim i zawiera 138 stron maszynopisu oraz składa się ze streszczenia, spisów treści, użytych symboli i oznaczeń, tabel i ilustracji, wykazu publikacji Autora, ośmiu rozdziałów, załącznika oraz spisu bibliografii.

Politechnika Śląska

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

ul. Konarskiego 18a, pok. 407, 44-100 Gliwice
+48 32 237 10 69
andrzej.katunin@polsl.pl

NIP 631 020 07 36

ING Bank Śląski S.A. o/Gliwice 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056



HR EXCELLENCE IN RESEARCH





Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
BIAŁYSTOKA

W rozdziale 1. Autor przedstawił krótki wstęp do badanych zagadnień oraz zdefiniował podstawowe pojęcia w zakresie technik badań nieniszczących (NDT) oraz SHM. Szczególną uwagę Autor poświęcił wyjaśnieniu podstaw zagadnień falowych w ośrodkach stałych.

Kolejny rozdział został poświęcony przeglądowi literatury i stanu wiedzy w zakresie NDT i SHM. Autor rozprawy skupił się w tym rozdziale na zagadnieniach detekcji i lokalizacji uszkodzeń w strukturach z wykorzystaniem technik fal prowadzonych, omawiając szczegółowo kwestie efektywności detekcji i identyfikacji uszkodzeń oraz czynników mających na to wpływ, a także infrastruktury badawczej wykorzystywanej przy akwizycji danych z systemów pomiarowych, stosowanych w SHM.

W rozdziale 3. został zdefiniowany zakres rozprawy (jako poziom analizy uszkodzeń określono możliwość kwantyfikacji uszkodzeń przez opracowywane algorytmy) oraz określono otwarte problemy w prowadzonych przez Autora badaniach. Ponadto, w rozdziale zostały opisane zastosowane w badaniach metryki przy analizie uszkodzeń, wymieniono wykonane w ramach rozprawy zadania, które pomogły osiągnąć zdefiniowany cel, a także zamieszczono streszczenie kolejnych rozdziałów oraz wyników z referencjami do poszczególnych podrozdziałów, w których zostały przedstawione. W ostatnim podrozdziale sformułowano tezę i cele rozprawy.

Rozdział 4. zawiera sformułowanie metody lokalizacji uszkodzeń z wykorzystaniem ulepszonego przez Autora algorytmu SEC. Zademonstrowany w tym rozdziale algorytm umożliwia ograniczenie się do wybranego sektora przy detekcji i lokalizacji uszkodzenia, co ma istotny wpływ na obniżenie czasu niezbędnego na wspomniane operacje w porównaniu do analizy całej przestrzeni badanej struktury.

W rozdziale 5. Autor rozprawy opisał wyniki badań weryfikacyjnych, przeprowadzonych według metody lokalizacji uszkodzeń sformułowanej w rozdziale 4. Rozpatrzono dwa przypadki, w których badano struktury niehomogeniczne z pojedynczym i wielokrotnymi uszkodzeniami udarowymi. Przedstawione wyniki badań wskazują na wysoką dokładność lokalizacji uszkodzeń.

Rozdział 6. stanowi obszerne studium weryfikacyjne opracowanej metodyki, w którym Autor przedstawił trójstopniową metodę diagnozowania struktur, zawierającą etapy detekcji, lokalizacji i kwantyfikacji uszkodzeń. Autor właściwie zaplanował i przeprowadził eksperymenty dla analizowanych przykładów weryfikacyjnych, umożliwiając demonstrację różnych przypadków występowania uszkodzeń (rozmieszczenie, liczba), ich różnych rodzajów oraz materiałów, w których występowały. Na uwagę zasługuje połączenie map barwnych dla uszkodzeń znajdujących się wewnątrz i na zewnątrz w stosunku do rozmieszczenia czujników przy wizualizacji wyników badań. W rozdziale zostały również przedstawione różne metody eksperymentalne, w których wykorzystano aktuatory/czujniki piezoelektryczne w kombinacji z laserowym wibrometrem lub czujnikami światłowodowymi. Ostatecznie rozpatrzono wyniki uzyskane z wykorzystaniem symulacji numerycznych metodą elementów skończonych. Autor rozprawy właściwie podkreślił zalety



poszczególnych rozwiązań, które sprowadzają się przede wszystkim do uzyskania stosunkowo wysokiej dokładności lokalizacji uszkodzeń oraz znacznego obniżenia czasu potrzebnego na przetwarzanie uzyskanych wyników badań.

W rozdziale 7. Autor rozprawy przeanalizował konfiguracje i parametry klejenia czujników światłowodowych na uzyskiwane wyniki badań. Przeprowadzone badania numeryczne i eksperymentalne umożliwiły określenie pożądanych parametrów klejenia czujników światłowodowych i stanowią oryginalny wkład Autora w rozwój wspomnianej techniki pomiarowej.

W rozdziale 8. Autor przedstawił krótkie podsumowanie wykonanych prac z wyszczególnieniem najważniejszych osiągnięć oraz sformułował kierunki dalszych prac badawczych w tematyce rozprawy. Na koniec rozdziału Autor przedstawił dowód sformułowanej tezy rozprawy.

W załączniku zostały zawarte wybrane wyniki badań, uzasadniające wybór poszczególnych parametrów w trakcie prowadzenia eksperymentów i symulacji numerycznych, a także zostało opisane narzędzie w środowisku Matlab, opracowane przez Autora do celów konfiguracji badań z wykorzystaniem czujników światłowodowych.

Bibliografia zawiera 128 pozycji, w tym 11 z nich stanowią pozycje, w których Autor rozprawy jest współautorem.

2. Cel rozprawy i teza naukowa

W podrozdziale 3.5 została zdefiniowana teza i cele rozprawy. Sformułowana teza wskazuje na możliwość opracowania wieloetapowej metodyki SHM do celów identyfikacji uszkodzeń z jednoczesnym wykorzystaniem różnych par technik pomiarowych. Stwierdzam, że teza rozprawy została sformułowana w sposób poprawny. Głównym celem jest opracowanie i ocena efektywności nowej wieloetapowej metody hybrydowej do identyfikacji uszkodzeń, opierającej się na wykorzystaniu trzech technik pomiarowych: Dopplerowskiej wibrometrii laserowej, aktuatorów/czujników piezoelektrycznych oraz czujników światłowodowych z siatkami Bragga. Zdefiniowany cel rozprawy jest uzasadniony poprawą efektywności detekcji, lokalizacji i kwantyfikacji różnych rodzajów uszkodzeń w różnych typach struktur, co zostało wykazane przez Autora w rozprawie i poparte licznymi oryginalnymi wynikami. Na podstawie analizy całokształtu rozprawy stwierdzam, że sformułowana teza rozprawy została spełniona, a zdefiniowane cele osiągnięte poprzez opracowanie metodyki identyfikacji uszkodzeń w celu monitorowania badanych struktur z wykorzystaniem wspomnianych technik pomiarowych. Opracowana metodyka została zweryfikowana na licznych przypadkach badanych struktur, co podkreśla Autor rozprawy w podrozdziale 8.4.



Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA

3. Ocena merytoryczna pracy

W opiniowanej rozprawie Autor zaproponował nową wieloetapową metodę hybrydową do identyfikacji uszkodzeń w strukturach z zastosowaniem par technik pomiarowych: Dopplerowskiej wibrometrii laserowej, aktuatorów/czujników piezoelektrycznych oraz czujników światłowodowych z siatkami Bragga oraz zaproponował efektywne algorytmy analizy wyników pomiarów. Opracowane algorytmy umożliwiają redukcję zarówno liczby zastosowanych w badaniu czujników oraz czasu, potrzebnego na identyfikację uszkodzenia, co zostało potwierdzone w przeprowadzonych eksperymentach. Jest to szczególnie istotne z praktycznego punktu widzenia, mając na uwadze, że jednym z głównych ograniczeń przy wdrażaniu systemów SHM w problemach inżynierskich jest duża liczba czujników, niezbędna do efektywnego działania systemu, co zazwyczaj wiąże się z istotnymi nakładami finansowymi.

Przeprowadzony przez Autora rozprawy przegląd aktualnego stanu wiedzy, przedstawiony w rozdziale 2., który dotyczy głównie zagadnień związanych z detekcją i lokalizacją uszkodzeń w ośrodkach stałych i uwzględnia większość najnowszych rozwiązań, uzyskanych przez zespoły naukowe, zajmujące się badaniami w zakresie podjętej tematyki badań. Jednak, w wielu miejscach rozprawy przegląd sprowadza się do wyszczególnienia publikacji cytowanych autorów i krótkiego streszczenia ich najważniejszych dokonań w cytowanych pracach. W rozprawie zabrakło komentarza do omawianych prac, łączącego obecny stan wiedzy oraz otwarte problemy z zakresem badań, których podjął się Autor. Brakuje również odwołania do przeprowadzonego przeglądu literatury przy definiowaniu celów rozprawy w rozdziale 3. W tymże rozdziale zamieszczono streszczenie kolejnych rozdziałów, listę wykonanych zadań, badanych próbek oraz poszczególnych wyników, uzyskanych w ramach rozprawy. Teza i cele rozprawy są definiowane na końcu rozdziału, co stanowi pewne zaburzenie w kolejności przedstawiania treści, tj. teza i cele są sformułowane po przedstawieniu uzyskanych wyników badań.

Zaproponowany przez Autora ulepszony algorytm SEC, skierowany na ograniczenie przetwarzania danych pomiarowych do wstępnie wyselekcjonowanych sektorów, w których zostało wykryte uszkodzenie stanowi cenne opracowanie, pozwalające istotnie zmniejszyć czas takiego przetwarzania. Należy również zwrócić uwagę na możliwość detekcji i lokalizacji uszkodzeń nawet w przypadku ich obecności poza ścieżkami tworzonymi przez pary aktuator-czujnik. Przeprowadzone badania weryfikacyjne potwierdziły skuteczność opracowanej metody przy lokalizacji pojedynczych i wielokrotnych uszkodzeń. Należy podkreślić trafność wyboru badanych struktur oraz uszkodzeń. Struktury kompozytowe wybrane do badań weryfikacyjnych stanowią dobry przykład, nawiązujący do elementów statków powietrznych oraz innych urządzeń i środków transportu; ponadto, anizotropia materiałowa, charakteryzująca badane struktury stanowi dodatkową możliwość weryfikacji zaproponowanej metody. Niskoenergetyczne uszkodzenia udarowe, wprowadzone w badanych strukturach, stanowią szczególnie ciekawy przypadek, przede wszystkim ze względu na ich trudną wykrywalność oraz skomplikowane właściwości geometryczne. Ponadto, w inspekcjach statków powietrznych taki rodzaj uszkodzeń jest uznawany za jeden

z najtrudniej wykrywalnych. Zatem uważam, że wybór analizowanych przypadków jest trafny i zasadny. Przeprowadzone obszerne badania weryfikacyjne umożliwiły wszechstronną ocenę opracowanej metodyki dla różnych struktur i rodzajów uszkodzeń, różnych parametrów badań oraz różnych układów pomiarowych, które, poza klasycznymi czujnikami piezoelektrycznymi w układzie aktuator-czujnik, zawierały autorskie sposoby wykonywania badań z wykorzystaniem wibrometrii laserowej lub czujników światłowodowych z wymuszeniem przy pomocy aktuatora piezoelektrycznego. Na podstawie opracowanej metodyki Autor opracował narzędzie w środowisku Matlab, pozwalające na konfigurację eksperymentów z wykorzystaniem czujników światłowodowych, opisanych w rozprawie.

Rozprawa została napisana w sposób przejrzysty i poprawny, treści w pracy zostały przedstawione we właściwej kolejności, jednak są niebalansowane ze względu na ich długość: różnice w objętości rozdziałów 4. i 7. oraz rozdziału 6. są znaczące.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

W wyniku lektury pracy zostały sformułowane poniższe komentarze, uwagi krytyczne i dyskusyjne.

- 1) Omawiany w rozdziale 4. problem liczby czujników używanych do detekcji uszkodzenia prowadzi do innego problemu, polegającego na kompromisie pomiędzy liczbą czujników i dokładnością lokalizacji uszkodzenia. Zaproponowana metoda oparta na algorytmie SEC prowadzi do redukcji liczby punktów na siatce oraz czasu lokalizacji uszkodzenia, co zostało potwierdzone przez Autora. Nasuwają się jednak pytania: w jaki sposób dobrać liczbę czujników, aby zakres kątowny obserwacji był odpowiedni do wielkości uszkodzenia? Jak zachowa się system w przypadku, gdy uszkodzenie będzie obejmowało kilka sektorów tworzonych przez pary aktuatora i czujników?
- 2) Rzeczywiste struktury, występujące np. w elementach konstrukcyjnych samolotów lub konstrukcji budowlanych mają zazwyczaj skomplikowaną postać geometryczną z licznymi usztywnieniami, zmianami grubości, itd. Jak należałoby skonfigurować system i dostosować metodykę badań, aby możliwa była identyfikacja uszkodzeń w tak skomplikowanych elementach?
- 3) Na jakich zasadach należy dobierać progi przy wizualizacji i kwantyfikacji uszkodzeń, które mogą wystąpić w badanej strukturze? Jak należy dobierać progi w przypadku wystąpienia kilku uszkodzeń o różnej intensywności?
- 4) Jak dobierano energię uderzeń przy wprowadzaniu uszkodzeń uderzowych w badanych strukturach?



- 5) Jakie są przyczyny błędów, uzyskiwanych przy lokalizacji uszkodzeń w przykładach omówionych w rozdziale 6.?
- 6) Jaki jest cel zastosowania gumowych podkładek, użytych w eksperymencie, opisanym w rozdziale 6.3?
- 7) Rozpatrywany model numeryczny w rozdziale 6.4 posiada uszkodzenia, symulowane poprzez lokalne obniżenie sztywności o 60%, co wydaje się wysoką wartością, biorąc pod uwagę rzeczywiste problemy badawcze z wykorzystaniem metod SHM. Proszę uzasadnić wybór takiej wartości oraz wskazać jaka jest przybliżona granica wrażliwości opracowanej metody na uszkodzenia w postaci obniżenia sztywności.

Praca zawiera drobne uchybienia redakcyjne, w tym nieliczne błędy gramatyczne i interpunkcyjne, błędy w oznaczeniach. Nie mają one jednak wpływu na wysoką jakość merytoryczną i redakcyjną rozprawy oraz nie umniejszają wartości osiągniętych wyników w ramach przeprowadzonych prac badawczych.

5. Ocena końcowa

Przeprowadzone badania w ramach pracy doktorskiej wpisują się w aktualne kierunki badań w zakresie technik NDT i SHM oraz są zgodne ze światowymi trendami. Opracowana metodyka monitorowania uszkodzeń w strukturach z wykorzystaniem wieloetapowej analizy wyników pomiarów oraz nowych rozwiązań sprzętowych w zakresie technik fal prowadzonych stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wkład Autora rozprawy w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. Rozprawa cechuje się wysokim poziomem merytorycznym, a Autor demonstruje posiadanie niezbędnej wiedzy teoretycznej w zakresie technik SHM oraz zagadnień pokrewnych. Ponadto, Autor wykazuje zdolności do samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych. Na uwagę zasługuje również ponadprzeciętna aktywność publikacyjna Autora.

Stwierdzam, że przedłożona mi do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Kaleeswarana Balasubramaniam spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez aktualnie obowiązującą ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, i wnioskuję do Rady Naukowej ws. Nadania Stopnia Doktora w Instytucie Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.