

dr hab. inż. **Piotr Nazarko**, prof. PRz
Katedra Mechaniki Konstrukcji
Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza
ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
e-mail: pnazarko@prz.edu.pl

Rzeszów, dnia 13.10.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Shishira Kumara Singha pt. „Electromechanical impedance-based
damage detection and localization employing data fusion techniques”

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania recenzji stanowią:

- pismo nr RN-421-2/23 Pana dr. hab. Marcina Lackowskiego, prof. IMP PAN, Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk z dnia 8 sierpnia 2023 r. wraz z dołączoną do niego rozprawą doktorską Pana mgr. inż. Shishira Kumara Singha pod tytułem „Electromechanical impedance-based damage detection and localization employing data fusion techniques”,
- umowa o dzieło nr 10.08/D/1 zawarta w dniu 10.08.2023 r.

Oceniana praca została zrealizowana w Zakładzie Mechaniki Struktur Inteligentnych Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk pod kierunkiem dr. hab. Pawła Malinowskiego, prof. IMP PAN – promotora rozprawy, oraz dr. inż. Rohana Somana – promotora pomocniczego.

2. Ocena tematyki rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy bardzo ważnego obszaru inżynierii mechanicznej związanego z systemami monitorowania stanu konstrukcji (SHM) ze szczególnym uwzględnieniem metody impedancji elektromechanicznej (EMI) do wykrywania i lokalizacji uszkodzeń, zwłaszcza w strukturach lekkich. Zagadnienie to, od wielu już lat, cieszy się zainteresowaniem naukowców i ośrodków badawczych ze względu na jego przydatność w zadaniach ciągłego monitorowania oraz zdolność do wykrywania niewielkich nawet uszkodzeń. Duże wyzwanie dla metod nieniszczących i ich przydatności stanowią m.in. zmienne warunki otoczenia, rodzaj elementu i materiału. Oceniana praca skupia się na poprawie dokładności wykrywania uszkodzeń w różnych strukturach (metalowych, kompozytowych, druk 3D), poprzez zastosowanie różnych technik fuzji danych. Badania obejmują również analizę

i porównanie wyników dla różnych układów czujników przy zastosowaniu nowego parametru kwantyfikacji i klasyfikacji uszkodzeń. Zaproponowano także podejście do fuzji danych wykorzystujące analizę składników głównych (PCA) i samoorganizujące się mapy (SOM). Ponadto w pracy omówiono wyniki lokalizacji uszkodzeń przy użyciu zmodyfikowanej funkcji wag prawdopodobieństwa, wprowadzając jednocześnie podejście oparte na odchyleniu standardowym do wyboru efektywnych zakresów częstotliwości w celu wykrywania i klasyfikacji uszkodzeń.

Można zatem uznać, że podjęty przez doktoranta temat badań, mający na celu poszukiwanie skutecznych metod wykrywania i lokalizacji uszkodzeń, jest zasadny i potrzebny z praktycznego punktu widzenia.

Biorąc pod uwagę dość szeroko zakrojone badania uwzględniające fuzję różnych danych w odniesieniu do metody impedancji elektromechanicznej (EMI) i różnych podejść zmierzających do poprawy dokładności wykrywania i lokalizacji uszkodzeń w różnych typach struktur, w mojej ocenie tytuł rozprawy w odpowiednim stopniu oddaje zrealizowany jej zakres.

3. Charakterystyka rozprawy

Oceniana rozprawa doktorska napisana została w języku angielskim i obejmuje łącznie 140 stron, na które składają się: podziękowania i dwustronicowe streszczenie, wykaz autorских artykułów i wystąpień konferencyjnych, spis treści, rysunków i tabel, 111 stron tekstu podstawowego, wykaz literatury (131 pozycji).

Praca składa się z 6 rozdziałów. Pierwszy z nich (18 stron) zawiera wprowadzenie w tematykę rozprawy. Zwrócono w nim uwagę na istotne z punktu widzenia podjętej problematyki zagadnienia, takie jak: motywacja do podjęcia badań, zjawisko piezoelektryczne i czujniki, zjawisko impedancji elektromechanicznej, różne podejścia do monitorowania stanu konstrukcji z wykorzystaniem impedancji. Dokonano tego w formie przeglądu aktualnego stanu wiedzy w zakresie tematyki rozprawy. Ponadto w rozdziale tym określono także lukę badawczą, cele pracy i przedstawiono jej układ.

Drugi rozdział zawiera wyniki badań związanych z szeregowym i równoległym łączeniem czujników piezoelektrycznych w kontekście wykrywania uszkodzeń metodą impedancji elektromechanicznej. Podano w nim uzasadnienie konieczności łączenia czujników wraz podstawami teoretycznymi i konfiguracjami czujników analizowanymi w trakcie badań doświadczalnych. Przedstawione w tym rozdziale wyniki dotyczą stałego pasma

z dwoma czujnikami piezoelektrycznymi działającymi w zmiennych warunkach temperatury otoczenia. Pierwsze zadanie dotyczyło wykrywania dołączanej dodatkowej masy (trzy poziomy temperatury 19°C, 23°C i 30°C), a w drugim identyfikowano zasymulowane pęknięcie pasma (w temperaturze otoczenia 19°C, 24°C i 31°C). Na tej podstawie stwierdzono, że równoległe połączenie czujników (p12p) prowadzi do lepszych rezultatów identyfikacji uszkodzeń niż ich połączenie szeregowym oraz wykorzystanie danych jedynie z pojedynczych przetworników piezoelektrycznych.

W rozdziale trzecim omówiono techniki fuzji danych w odniesieniu do poziomu zmiennych oraz czujników. Autor wyjaśnia, jak te techniki mogą pomóc w poprawie dokładności wykrywania uszkodzeń. Przedstawione tam wyniki dotyczą nowego indeksu uszkodzenia F (bazującego na wartościach G i R) oraz wielopoziomowej fuzji danych z wykorzystaniem analiza składników głównych (PCA) i samoorganizacyjnych się sieci neuronowych (SOM) dla różnych danych eksperymentalnych.

Rozdział czwarty zawiera omówienie wyników badań związanych z obrazowaniem położenia uszkodzeń na podstawie sieci sensorów, zarówno w przypadku występowania pojedynczego, jak i kilku równoczesnych uszkodzeń. Uwzględniały one analizę wpływu wielkości promienia obszaru wykrywania na dokładność identyfikacji i potrzebnego do tego czasu oraz stosowania różnych metryk uszkodzenia. W odniesieniu do jednego z analizowanych modeli płytowych podjęto próbę optymalizację sieci czujników z uwagi na możliwość wykrywania uszkodzeń. W celu zwiększenia dokładności identyfikacji ich położenia użyto nowej metody odwrotnej, wykorzystującej analityczny model zależności promienia i kąta opisującego położenie uszkodzenia oraz indeksu uszkodzenia, które ustalane są na podstawie danych pomiarowych.

W rozdziale piątym przedstawiono nowe podejście, które wykorzystuje odchylenie standardowe w celu wyboru określonych pasm częstotliwości, najkorzystniejszych pod względem wykrywania uszkodzeń. Wybór zakresu częstotliwości bazuje na różnicy między danymi w stanie bez uszkodzenia i z uszkodzeniem. W dodatku połączenie parametrów G i R z funkcją gęstości prawdopodobieństwa pozwala identyfikować i klasyfikować uszkodzenia. Dot tego zadania wykorzystano dane analityczne i eksperymentalne dla określonych zakresów częstotliwości, wprowadzając również technikę probabilistycznego całkowania opartego na fuzji danych. Technikę wykorzystującą indeks RMSD porównywano też z wynikami uzyskanymi dla indeksu C, odnoszącego się do macierzy uszkodzeń i danych statystycznych. Podejście to wydaje się odpowiednie do jednoczesnego określania zarówno lokalizacji, jak i stopnia

uszkodzenia, i działa lepiej w sytuacji mniej istotnych uszkodzeń. Dzieje się to za sprawą wprowadzonego indeksu C. To nowatorskie podejście poprawiło zdolność do wykrywania uszkodzeń w porównaniu z konwencjonalnym podejściem (RMSD), wykorzystując największe prawdopodobieństwo obszaru wyznaczonego krzywymi odpowiadających stanowi bez uszkodzenia i z uszkodzeniem dla wybranego zakresu częstotliwości.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie pracy, w którym zebrano najistotniejsze wnioski oraz wskazano kierunki dalszych badań.

4. Ocena rozprawy doktorskiej

4.1. Ocena merytoryczna

Oceniana praca posiada przemyślany i logiczny układ. Autor dobrze umotywował zasadność podjętej tematyki badań na tle aktualnego stanu wiedzy. Zrealizowane w pracy badania są też dobrze zaplanowane. Prawidłowo dobrano narzędzia i procedury przetwarzania danych pomiarowych, formułując przy tym logiczne wnioski. W ten sposób doktorant wykazał się odpowiednim poziomem wiedzy i umiejętności w przeprowadzaniu badań oraz programowaniu z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi i metod numerycznych.

W mojej ocenie głównymi i oryginalnymi osiągnięciami Doktoranta są:

- opracowanie nowego podejście do identyfikacji uszkodzeń na podstawie fuzji danych pochodzących z metody EMI, wykorzystując do tego celu indeks Q (bazujący na PCA) oraz indeks T^2 ;
- przedstawienie nowatorskiej metody lokalizacji uszkodzeń przy użyciu sygnatury impedancji EMI opartej na metodzie odwrotnej;
- zastosowanie nowatorskiego podejście opartego na odchyleniu standardowym w celu wyboru najbardziej efektywnych zakresów częstotliwości do wykrywania uszkodzeń.

Dzięki podjętym działaniom Doktorant wykazał, że wykorzystanie fuzji danych bazujące na probabilistycznym całkowaniu przy użyciu indeksu C, uwzględniające różnice w stanie monitorowanych obszarów analizowanych struktur, jest efektywnym podejściem prowadzącym do identyfikacji uszkodzeń, niezależnie od badanego ich rodzaju.

Choć formułowanie tezy rozprawy doktorskiej i jej udowadnianie nie stanowią wymogu formalnego, to jednak na podstawie zawartych w rozprawie wyników badań numerycznych stwierdzam, że zaproponowane przez autora podejścia są w stanie

- poprawić wydajność identyfikacji uszkodzeń w porównaniu z konwencjonalnym podejściem,

- zlokalizować uszkodzenia z satysfakcjonującą dokładnością wykorzystując sieć czujników,
- poprawić wydajność wykrywania uszkodzeń opartego na fuzji danych i kwantyfikowanej wielkości uszkodzenia, poprzez wybór efektywnego zakresu częstotliwości wykorzystując do tego celu parametry statystyczne, takie jak odchylenie standardowe.

Ponadto Recenzent nie zauważył w rozprawie żadnych istotnych błędów ani zaniedbań. Przedstawione poniżej komentarze i pytania mają jedynie przyczynić się do ewentualnego zwiększenia przejrzystości i walorów poznawczych rozprawy:

- 1) Na str. 8 podano, że „...plot shows the response for the free, healthy, and damaged conditions of the structure.” Co autor rozumie poprzez określenie „free condition”?
- 2) W rozdziale 2, na str. 20 jest mowa o tym, że „The method covered in this chapter uses two sensors operating in tandem to lessen the impact of temperature change.” Potrzebne byłoby podanie szczegółów na ten temat lub wskazanie odniesienia do literatury.
- 3) W jaki sposób mocowana była do modelu dodatkowa masa, o której jest mowa m.in. na str. 22?
- 4) Jak wytłumaczyć to, że wartość RMSD na rys. 2.8 jest większa w przypadku p2 niż p1? Można to zauważyć w przypadku danych „M-row”, choć uszkodzenie jest bliżej p1.
- 5) Co oznacza skrót „wrt” zawarty w tabeli 2.1 na str. 28 oraz tabeli 2.2 na str. 30?
- 6) Czego dotyczą oznaczenia zawarte w opisie osi poziomej na wykresach przedstawionych na rys. 3.4, str. 39?
- 7) Jeden z bloków (romb „if damaged”) w schemacie ideowym przedstawionym na rys. 4.10 nie posiada wyjścia „no”. Czy to celowe działanie?
- 8) Dlaczego przetworniki piezoelektryczne przedstawione na rys. 4.1 zostały ponumerowane z krokiem co 2?

4.2. Uwagi redakcyjne

Praca napisana jest w sposób zrozumiały i na ogół poprawny pod względem językowym. Autor poprawnie stosuje odsyłacze do rysunków, tabel i pozycji literatury. Do nielicznych usterek redakcyjnych zaliczyć można:

- w niektórych rysunkach (np. 3.21-3.23, 5.8, 5.10, 5.11, 5.15) brakuje podpisów (a, b, c, d) wykresów wchodzących w skład tych rysunków, a występują one w podpisie pod rysunkiem,

- str. 54, ostatnie zdanie w pierwszym akapicie, powinno być „Fig. 3.20d” zamiast „Fig. 3.20”.
- tekst kontynuowany po formułach matematycznych posiada niekiedy zbędne wcięcie pierwszego wiersza akapitu (np. po wzorze 3.6, 3.13, 4.4, 4.6,)niekiedy
- na str. 75 urwane jest zdanie pod wzorem 4.6: „between the two.”
- str. 94, brak odstępu pomiędzy cyframi a jednostkami (np. powinno być „10 mm” zamiast „10mm”),
- w niektórych miejscach pracy akronimy pisane są małymi literami, co najczęściej występuje jednak w wykazie publikacji (np. w pozycjach 26, 30, 59, 60, 74, 78-80, 90, 94),
- w pozycji nr 53 literatury występują niepotrzebnie komendy „<title>,</title>”, natomiast w pozycji nr 131 brakuje tytułu artykułu.

Podsumowując pragnę podkreślić, że wszystkie wykazane powyżej usterki tekstu nie umniejszają wysokiej wartości rozprawy i powinny stanowić dla autora przede wszystkim charakter informacyjny, zwłaszcza jeśli w przyszłości planowane jest opublikowanie wyników zrealizowanych badań w formie artykułów naukowych.

5. Wniosek końcowy

Na podstawie przeprowadzonej oceny pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Shishira Kumara Singha pod tytułem „Electromechanical impedance-based damage detection and localization employing data fusion techniques” stwierdzam, że opiniowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a doktorant wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Poprawnie zinterpretował uzyskane w pracy wyniki formułując przy tym wnioski końcowe, istotne z naukowego i praktycznego punktu widzenia.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2023 poz. 742), dlatego wnioskuję do Rady Naukowej o dopuszczenie doktoranta do kolejnych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Piotr Nawerko