

Prof. zw. dr hab. inż. Jan Awrejcewicz  
Członek korespondent PAN  
Politechnika Łódzka  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Automatyki, Biomechaniki I Mechatroniki

**Opinia o rozprawie doktorskiej mgr inż. Aleksandry Waszczuk-Młyńskiej  
pt. „*Diagnostyka uszkodzeń układów płytowych i membranowych*”.**

Podstawa wykonania recenzji: pismo Prodziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych prof. nzw. dr hab. inż. Witolda Marowskiego z dnia 24.07.2018 z prośbą o opracowanie opinii.

1. Sylwetka doktorantki

Niestety nie otrzymałem materiałów, a w tym „życiorysu naukowego” doktorantki, który mógłby być pomocny przy ocenie jej aktywności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej.

Z drugiej strony miałem z nią kontakty naukowe podczas mej pracy na PW oraz podczas jej udziału w konferencji „Dynamical Systems – Theory and Applications”, która odbyła się w Łodzi w dniach 11-14.12.2017.

Kandydatka w spisie literatury wymienia dwie swoje współautorskie prace i jedną pracę dyplomową inżynierską (poz. [48], [49], [51]).

2. Krótka charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska (106 stron) pt. „*Diagnostyka uszkodzeń płytowych i membranowych*” składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu podstawowych oznaczeń i skrótów, ośmiu rozdziałów, spisu literatury (70 pozycji) oraz załącznika, gdzie pojawia się wiele wykresów bez opisu wprowadzającego.

Jeśli chodzi o stronę merytoryczną rozprawy, to jej układ i struktura są poprawne oraz generalnie można zaakceptować wybór literatury, chociaż dominują w niej pozycje polskich autorów podczas gdy podjęta przez doktorantkę tematyka należy obecnie do wiodących

nurtów badań naukowych zwłaszcza za granicą. Takie podejście utrudniło mi dokonanie oceny pracy na tle osiągnięć innych wiodących autorów/ośrodków zagranicznych.

Na początku rozprawy sformułowano tezę i cel pracy oraz przedstawiono obiekt badań. Autorka uzasadnia znaczenie teoretyczne i aplikacyjne wyboru tematyki rozprawy a wyniki badań podane zostały w wersji opisowej, graficznej i tabelarycznej.

Ostatni rozdział rozprawy podsumowuje całość dokonanych badań i analiz oraz przedstawia wnioski końcowe.

Należy podkreślić, że tematyka rozprawy wpisuje się w nurt nowoczesnych trendów aplikacyjnie zorientowanych badań drgań układów mechanicznych ciągłych ukierunkowanych na wykrywanie ich uszkodzeń oraz zawiera prognozy dotyczące ich bezpiecznej pracy.

Pozytywnie oceniam odwagę naukową doktorantki, która nie bała się szeroko podejść do trudnej tematyki modelowania i walidacji uszkodzeń układów mechanicznych w których występują elementy membranowe.

Praca obejmuje opracowanie modelu analitycznego membrany kołowej z uszkodzeniem i bez uszkodzenia, weryfikację tego modelu w oparciu o wykorzystanie metody elementów skończonych na bazie programu ANSYS oraz jej walidację na dedykowanym do tego celu stanowisku doświadczalnym. Ponadto na podkreślenie zasługuje sprawne posługiwanie się doktorantki przekształceniami Hilberta oraz metodami probabilistycznymi i momentami widmowymi stosowanymi w diagnostyce uszkodzeń układów membranowych.

Jednakże strona redakcyjna i stylistyczna rozprawy w wielu miejscach jest nie do zaakceptowania. Ponadto sposób pisania rozprawy w wielu miejscach uniemożliwia jej zrozumienie i wymaga dużego wysiłku w celu sprawdzenia poprawności prezentowanych w niej wywodów/wyników.

### 3. Analiza rozprawy i uwagi krytyczne

Wątpliwości budzi tytuł rozprawy, bowiem nie znalazłem w niej badań dotyczących płyt. Ponadto nie wiadomo, jakie płyty autorka ma na myśli bo obecnie w literaturze naukowej ich klasyfikacja jest szeroka.

Wprawdzie streszczenie rozprawy jest napisane w języku angielskim, ale brak jest tytułu rozprawy w tym języku.

W rozdziale 1 obejmującym wstęp, przegląd literatury oraz cel i tezę pracy autorka uzasadnia znaczenie wyboru tematyki rozprawy w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa pracy układów maszynowych i urządzeń technicznych.

Jak już wcześniej wspominałem przegląd literatury chociaż nie obejmuje wielu istotnych prac zagranicznych jednak uwypukla potrzebę stosowania parametrów/kryteriów/współczynników użytecznych przy wykrywaniu uszkodzeń.

Autorka podaje główny cel pracy ukierunkowany na opracowanie modelu analitycznego nadzorowanego obiektu narażonego na uszkodzenie oraz na wykrywanie zmian rozkładu mocy zmodulowanego sygnału w pasmach wokół częstości oszacowanych poprzez model analityczny.

Doktorantka formułuje też dwie główne tezy. Te ostatnie chociaż podane zostały formalnie poprawnie lecz bez jakiegokolwiek opisu, co uniemożliwia ich zrozumienie bez uprzedniego przeczytania całej pracy.

Rozdział 2 w moim przekonaniu należy do najważniejszego elementu rozprawy bowiem dotyczy opracowania modelu analitycznego. Towarzyszy mu na górze umieszczony cytat z wypowiedzi Galileusza, ale pojawia się pytanie, dlaczego pozostałe rozdziały nie zostały uzupełnione podobnymi cytatami?

Wprawdzie formalnie w tym rozdziale nie znalazłem błędów merytorycznych, to jednak opis formalny metody jest zbyt ubogi, aby uwypuklić jej zalety i możliwości perspektywiczne jej wykorzystania do analizy innych układów ciągłych, a w tym płyt czy też powłok.

Autorka rozpoczyna analizę od podania powszechnie znanego równania drgań membrany rzędu drugiego liniowego i niejednorodnego (2.1), które następnie zostaje sformułowane przy użyciu współrzędnych biegunowych w postaci (2.3) i (2.6). Następnie formułuje warunki brzegowe (2.7), (2.8) i stosuje metodę Fouriera rozdzielenia zmiennych (2.9) redukując tym samym zagadnienie do rozwiązania niesprzężonych ze sobą równań różniczkowych zwyczajnych rzędu drugiego (2.10), (2.11) i (2.12) ze względu na czas i współrzędne biegunowe  $\varphi$  i  $r$ . O ile rozwiązanie dwóch pierwszych równań nie następuje żadnych trudności zwłaszcza po wprowadzeniu warunku okresowości do równania (2.11), to trzecie równanie jest równaniem nieliniowym Bessela, którego rozwiązanie jest na szczęście znane i ma postać (2.17). Ze względu na wprowadzone warunki brzegowe zagadnienie sprowadza się do wyznaczenia  $m$  miejsc zerowych funkcji Bessela pierwszego rodzaju dla kolejnych rzędów  $n$ ,

co autorka pokazała na rys. 2.1 i w tabeli 2.1 dla  $n=0,1,2,3$  (nie znalazłem cytowania rys. 2.1 w tekście).

Następnie podaje ona dwa rodzaje funkcji własnych (2.20), (2.21) (pojawia się pytanie odnośnie stałej  $A$ ) i w wyniku uzyskuje dwa niezależne rozwiązania dla membrany kołowej o postaci (2.24), (2.25).

Zdecydowanie największego wkładu teoretycznego autorki można dopatrywać się w sformułowaniu modelu membrany z uszkodzeniem w jej środku.

O ile ugięcie membrany nieuszkodzonej zawierało trzy zmienne  $w=w(r,\varphi,t)$  to wprowadzenie torusa z niepustym wnętrzem wymaga wprowadzenia czterech zmiennych  $w=w(\alpha,\beta,r,t)$ , gdzie kąt  $\beta$  spełnia rolę podobną do kąta  $\varphi$ . Parametryzacja torusa za pomocą współrzędnych biegunowych (2.27)-(2.28) wymaga bowiem trzech zmiennych  $r$ ,  $\alpha$  i  $\beta$ .

Następnie zostało policzonych wiele pochodnych zmiennych  $r$ ,  $\alpha$  i  $\beta$  pierwszego i drugiego rzędu ze względu na  $x$ ,  $y$  i  $z$  w celu wykorzystania wcześniej podanego równania drgań membrany. Jednak na początku str. 30 następuje gwałtowny nie do końca wytłumaczony przeskok rozważań. Dlaczego rozważania zostały ograniczone tylko do płaszczyzny torusa z wypełnionym wnętrzem, który powstaje w wyniku ruchu promienia  $R_0$  lub inaczej, jaka jest interpretacja fizyczna przypadków dla  $\alpha \neq 0$  i  $\alpha \neq \pi$ ?

W rozważanym przypadku  $\alpha=0$  otrzymujemy równanie powłoki z uszkodzeniem kołowym usytuowanym w jej środku opisanym równaniem (2.58) (odwołanie do równania (2.2) jest błędne).

Podobny algorytm rozwiązania zastosowano dla przypadku  $\alpha=\pi$ , a w efekcie po rozdzieleniu zmiennych ze względu na  $t$ ,  $\beta$  i  $r$  otrzymano trzy równania różniczkowe rzędu drugiego (2.65)-(2.67), ale równania (2.67) nie udało się już rozwiązać za pomocą funkcji Bessela i dlatego zastosowanie tzw. podstawienia Bessela w postaci szeregu nieskończonego do wyznaczenia funkcji  $R(r)$ . Stała „ $c$ ” wprowadzona w (2.76) wiąże się ze znakiem „+”, natomiast brak jest stałej dotyczącej znaku „-” (patrz (2.67) i czy w tym ostatnim przypadku

stała  $c = \frac{\omega^2}{a} - \frac{\mu^2}{R_0^2}$  może być mniejsza od zera? Według mnie pomyłone zostały oznaczenia

stałych  $c$  i  $c'$  w równaniu (2.78). Wydaje się naturalnym, że w celu oszacowania dokładności rozwiązania w oparciu o szereg Bessela (2.73) należałoby dokonać porównania otrzymanych

rozwiązań z rozwiązaniem numerycznym równania (2.70) dla wybranych parametrów, ale nie zostało to zrobione.

Odwołanie do szeregu (2.66) na str. 33 jest błędne. Czy doktorantka potrafi rozwiązać zagadnienie, gdy uszkodzenie membrany niekoniecznie znajduje się w jej środku, jak to zostało przedstawione w przykładzie 2.3? Czy istnieje możliwość zastosowania tej metody do analizy uszkodzeń membrany w kształcie elipsy, elipsy zdegenerowanej (linii) oraz prostokąta/kwadratu?

Rozdział 3 rozprawy został poświęcony weryfikacji modelu analitycznego przy wykorzystaniu metody elementów skończonych w oparciu o program ANSYS. Wprawdzie rozdział ten obejmuje pięć stron, to jednak wyniki obliczeń wraz z towarzyszącymi opisami, rysunkiem i tabelą nie przekraczają jednej strony. Weryfikacji dokonano dla kołowej membrany nieuszkodzonej oraz z uszkodzeniem w kształcie kołowych otworów o średnicy 5mm i 10mm.

Rozdział 4 dotyczy weryfikacji eksperymentalnej modelu analitycznego. Autorka w sposób zwięzły, ale krytycznie i z uwzględnieniem własnej oceny odnosi się do stosowanych urządzeń pomiarowych dotyczących prowadzonych przez nią badań doświadczalnych uwypuklając zalety stosowania wibrometru laserowego. Doktorantka wykorzystowała wibrometr laserowy PSV400 wyprodukowany przez firmę Polytec do przeprowadzenia badań doświadczalnych. Ponadto na podkreślenie zasługuje kontynuacja czysto inżynierskiej pracy doktorantki związanej z diagnozowaniem uszkodzeń membrany przy użyciu elementów piezoelektrycznych. W tym ostatnim przypadku oczekiwałbym jednak walidacji wyników poprzez MES ponieważ elementy piezoelektryczne zmieniają sztywność i masę badanego układu o czym zresztą autorka wspomina.

Badania doświadczalne zostały wykonane w Laboratorium Systemów Mechatronicznych Pojazdów i Maszyn Roboczych PW przy wykorzystaniu membrany instrumentu perkusyjnego-bębenka. Dzięki zastosowaniu oprogramowania LabView można było analizować sygnał drganiowy w dziedzinie czasu i częstotliwości.

Autorka napisała, że membrana pobudzana była taką akustyczną wygenerowaną przez głośnik niskotonowy i wzmacniacz Technics SU-A700. Jednak wydaje się naturalnym, że to wzbudzenie powinno być potraktowane jako funkcja wzbudzająca drgania membrany  $p(r,\varphi,t)$  w równaniu (2.3) i dalej powinno być wyznaczone rozwiązanie tego równania, czego w pracy nie znalazłem.

Wydaje mi się też, że interpretacja i wyjaśnienie otrzymanych doświadczalnie znormalizowanych widm amplitudowych odpowiedzi membrany nie jest w pełni wystarczające. Ponadto na str. 52 autorka napisała, że amplituda maleje wraz z uszkodzeniem, podczas gdy wykresy na rys. 4.12 wskazują na jej wzrost. Szczególnie pojawienie się wielu częstości dodatkowych w przypadku uszkodzenia o średnicy 10mm wymaga wyjaśnienia. Być może amplituda odpowiedzi była na tyle duża, że pojawiła się potrzeba wprowadzenia nieliniowości geometrycznej do równania (2.1) związanej z ugięciem membrany.

Na uwagę i pochwałę zasługuje rozdział 5, który został opracowany na potrzeby wykorzystania przekształcenia Hilberta do analizy uszkodzeń membrany w oparciu o obserwację pierwszej i drugiej postaci drgań przy wykorzystaniu pobudzenia obiektu niskimi częstotliwościami. Autorka m.in. wykazała, że wykorzystanie do analizy ułamkowej i uogólnionej transformaty Hilberta dostarcza wielu istotnych dodatkowych informacji w związku z oszacowaniem istnienia wielkości uszkodzenia w odróżnieniu od stosowania klasycznej transformaty Hilberta.

Otrzymane w tym rozdziale obwiednie dla różnych parametrów ułamkowej i uogólnionej transformaty Hilberta są kłopotliwe do przeprowadzenia wiarygodnych analiz i dlatego kolejny rozdział 6 autorka poświęciła opisowi i zastosowaniu metod probabilistycznych i momentów widmowych w celu redukcji danych ułatwiających poprawne wyciąganie wniosków z przeprowadzonych badań doświadczalnych.

Autorka wykazała, że pojawienie się uszkodzenia jest związane ze wzrostem pierwszego unormowanego momentu, a pozostałe momenty maleją wraz z pojawieniem się uszkodzenia i jego rozwojem. Charakter zmienności wartości momentów widmowych w funkcji kąta pozwala na jednoznaczną odpowiedź, czy obiekt badań jest uszkodzony lub nie bez znajomości jego wcześniejszej historii.

Może autorka mogłaby wyjaśnić te obserwacje poprzez fizykę zjawiska?

Kolejnym etapem pracy doktorantki było podjęcie próby oszacowania lokalizacji uszkodzenia. Zagadnienie to jest ważne, ponieważ miejsce lokalizacji uszkodzenia może wpłynąć w sposób istotny na jego dalszy rozwój. Wprawdzie autorka stwierdza, że uogólniona transformata Hilberta umożliwiła opracowanie metody oszacowania zmian ilościowych w oparciu o ocenę momentów widmowych od zerowego do trzeciego rzędu, jednak w moim odczuciu badania mają charakter wstępny i nie zostały zakończone. Potwierdza to również

autorka pisząc, że należy dokonać dużej liczby pomiarów i analiz dla gęstej siatki punktów zbieranych również poza okolicą środka badanego obiektu.

Ostatni rozdział 8 obejmuje podsumowanie całości przeprowadzonych badań i przedstawia wnioski końcowe z całości rozprawy.

#### 4. Uwagi o charakterze redakcyjnym i stylistycznym

Rozprawa została poprawnie przygotowana pod względem redakcyjnym, co zostało wcześniej przeze mnie opisane. Jednak zawiera ona bardzo dużo błędów/usterek redakcyjnych, nazewniczych i stylistycznych. Różne zdania nie są oddzielone między sobą za pomocą kropek, a przecinki w wielu miejscach nie są właściwie stosowane. Prowadzi to do zmniejszenia przejrzystości pracy i jej czytelności, a nawet braku zrozumienia oryginalnych wątków rozprawy.

Po namyśle, zdecydowałem się nie wymieniać tutaj wszystkich zauważonych błędów stylistycznych czy wręcz ortograficznych, które zostały odnotowane bezpośrednio na stronach recenzowanego egzemplarza pracy.

#### 5. Ocena końcowa rozprawy

Tematyka rozprawy doktorantki dobrze wpisuje się w aktualne trendy badań naukowych prowadzonych na świecie, postawione tezy pracy zostały udowodnione oraz cele pracy zostały osiągnięte. Autorka rozwiązała postawione zagadnienie naukowe w stopniu dobrym wykazując się zarówno szeroką wiedzą z obszaru teoretycznej mechaniki i matematyki stosowanej, jak również z badań inżynierskich z obszaru mechatroniki.

Doktorat jest w pełni domknięty w sensie przeprowadzonych badań teoretycznych, symulacyjnych oraz doświadczalnych. Na uwagę i podkreślenie zasługuje szeroka wiedza autorki udokumentowana m.in. poprawnym stosowaniem MES, LabView oraz sprawnym wykorzystywaniem wielu przyrządów pomiarowych czy generatorów drgań. Przeprowadzone analizy i interpretacje wyników badań analitycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych zostały przeprowadzone obiektywnie i nie budzą zastrzeżeń, a sformułowane wnioski są prawidłowe i w większości przypadków oryginalne. Do walorów rozprawy zaliczam:

- (i) zagadnienie naukowe rozprawy zostało przedstawione i rozwiązane poprawnie a cele naukowe zostały w pełni osiągnięte;

- (ii) rozprawa obejmuje klasyczną triadę, tzn. badanie teoretyczne prowadzące do sformułowania modeli analitycznych, badania eksperymentalne na oryginalnie zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku oraz badania symulacyjne/numeryczne do których głównie zaliczam MES;
- (iii) rozprawę zaliczam do dyscypliny mechanika;
- (iv) doktorantka wykazała się wysokim poziomem wiedzy nie tylko w dyscyplinie mechanika, ale również w obszarze mechatroniki i matematyki stosowanej oraz wykazała umiejętność i dociekliwość w prowadzeniu samodzielnych badań naukowych;
- (v) doktorantka właściwie dokonała analizy stanu wiedzy dotyczącej podjętej tematyki wskazując na potrzeb prowadzenia dalszych badań będących treścią rozprawy.

Ostatecznie rozprawę doktorską mgr inż. Aleksandry Waszczuk-Młyńskiej oceniam wysoko ze względu na oryginalny wkład autorki do podjętej tematyki badań. Rozprawa posiada wiele walorów poznawczych i użytkowych oraz świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu merytorycznym autorki do prowadzenia badań naukowych. Doktorantka wykazała się obszerną wiedzą wykraczającą poza mechanikę i obejmującą takie obszary naukowe jak modelowanie i dynamika układów, automatyka, mechatronika oraz dużą dojrzałością naukową w formułowaniu nowych zagadnień i badań prowadzących do otrzymania wiarygodnych rozwiązań.

Stwierdzam, że mgr inż. Aleksandra Waszczuk-Młyńska ma bardzo dobre przygotowanie teoretyczne i warsztatowe do prowadzenia twórczej pracy naukowej.

Ponadto stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez aktualnie obowiązującą ustawę o tytule i stopniach naukowych i wobec tego stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Aleksandry Waszczuk-Młyńskiej do obrony publicznej.

