



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Katedra Robotyki i Mechatroniki

Kraków, 12.06.2023 r.

dr hab. inż. Paweł Paćko, prof. AGH
Katedra Robotyki i Mechatroniki
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
AGH w Krakowie

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Piotra Fiborka

pt.

„Modelling of sandwich plates and piezoelectric transducers
to identify the severity of mechanical damage”



Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Robotyki i Mechatroniki
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 617 31 16, fax +48 12 634 35 05
e-mail: krim@agh.edu.pl, www.krim.agh.edu.pl

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Zastępcy Dyrektora ds. naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk Pana dr hab. inż. Grzegorza Żywicy, prof. IMP PAN, z dnia 14 marca br. poprzedzone wyborem recenzentów rozprawy przez Radę Naukową Instytutu w dniu 7 marca br.

2. Zawartość i ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska zatytułowana „*Modelling of sandwich plates and piezoelectric transducers to identify the severity of mechanical damage*” napisana została w całości w języku angielskim. Autorem pracy jest Pan mgr inż. Piotr Fiborek, a promotorem jest Pan dr hab. inż. Paweł Kudela, prof. IMP PAN.

Praca liczy 118 stron, z czego faktyczna zawartość merytoryczna została opisana na 99 stronach (pozostałą część stanowią załączniki i bibliografia). Praca podzielona została na 9 rozdziałów (wraz ze wstępem i podsumowaniem) oraz dwa załączniki.

W ogólnym ujęciu pracę należy ulokować w obszarze modelowania numerycznego i symulacji propagacji sprężystych fal prowadzonych. Zagadnienia te są jednymi z najbardziej wymagających problemów analizy numerycznej dynamiki (liniowych) układów mechanicznych. Zamierzeniem Autora pracy było wykorzystanie modelu numerycznego jako źródła wiedzy o zjawiskach falowych zachodzących podczas interakcji fal sprężystych ze złożoną strukturą panelu kompozytowego. Tym samym, celem pracy było wykorzystanie eksperymentu wirtualnego jako alternatywy dla kosztownych i długotrwałych eksperymentów fizycznych, dla celów doskonalenia systemów badań nieniszczących i ciągłego monitorowania stanu. Postawiony problem badawczy oraz sposób jego rozwiązania i weryfikacji, Doktorant opisał w kolejnych rozdziałach pracy.

W rozdziale 1 pracy Autor przedstawia główne zagadnienia związane z jej tematyką, niezbędne do jasnego zrozumienia dalszej części. We wstępie Doktorant opisuje m.in. strukturę panelu kompozytowego, który będzie poddany analizie, przetworniki piezoelektryczne, które najczęściej stosuje się w kontaktowych metodach badania stanu konstrukcji oraz krótko opisuje te metody. W tym samym rozdziale przedstawiono również krótką charakterystykę fal prowadzonych, wskazując główne wyzwania, z którymi należy się zmierzyć w trakcie ich wykorzystania do inspekcji konstrukcji płytowych. W tej części pracy Autor wskazał również na metody symulacyjne, które są stosowane do prowadzenia wirtualnych eksperymentów mających na celu lepsze poznanie zjawisk falowych towarzyszących interakcji fali sprężystej z uszkodzeniem, a także bywają wykorzystywane jako integralna część systemów monitorowania (np. jako cyfrowy bliźniak). Konkluzje z tego rozdziału jasno motywują podjętą przez Doktoranta tematykę badawczą, a opisy i wnioski poparte są odnośnikami do istotnych pozycji literaturowych (w tym tych, które ukazały się w ostatnich latach).

Rozdział 2 zawiera syntezę głównych wątków poruszonych w rozdziale pierwszym i na tej podstawie Autor sformułował problem badawczy jako *opracowanie nowego podejścia do oceny stopnia uszkodzenia w płytach kompozytowych o wewnętrznej strukturze plastra miodu (ang.*

HSC) z wykorzystaniem przetworników piezoelektrycznych. Doktorant zaproponował rozwiązanie postawionego problemu poprzez wyznaczenie zależności pomiędzy stopniem uszkodzenia a charakterystycznymi cechami fal sprężystych propagujących w badanej strukturze. Funkcyjną zależność tego typu, Autor określił skrótem MADIF (z ang. model-assisted damage identification function). W rozdziale wskazano również szczegółowe cele pracy, dzięki którym możliwe będzie osiągnięcie celu głównego, tj.:

- opracowanie efektywnego modelu numerycznego umożliwiającego symulację propagacji sprężystych fal prowadzonych w panelach typu HSC,
- walidacja eksperymentalna modelu numerycznego,
- wyznaczenie funkcji MADIF, w celu określenia wpływu uszkodzenia na wybrane cechy propagujących fal,
- analiza funkcji MADIF dla różnych warunków temperaturowych,
- analiza wpływu cech panelu HSC na funkcję MADIF.

W tej części pracy przedstawiony został również zakres pracy i krótka charakterystyka poszczególnych rozdziałów ułatwiająca zbudowanie wyobrażenia o strukturze pracy.

Rozdział trzeci zawiera opis strategii rozwiązania postawionego wcześniej problemu i udowodnienia tezy pracy przyjętej przez Autora. W tym celu Doktorant omówił zagadnienia modelowania propagacji fal sprężystych w panelach kompozytowych z rdzeniem o strukturze plastra miodu. Wskazał, że w analizie struktur kompozytowych często stosuje się metody bazujące na określeniu efektywnych własności materiałowych. Alternatywą do techniki homogenizacji jest modelowanie pełnej struktury geometrycznej (w pracy, model ten został opatrzony skrótem FCGM), jednak to podejście wiąże się z dużym wydatkiem czasowym i koniecznością zaangażowania dużych zasobów obliczeniowych. Jako sposób na redukcję czasu obliczeń, przy zachowaniu wysokiej dokładności wyników, Doktorant zaproponował wykorzystanie płytowych elementów spektralnych jako alternatywy dla elementów objętościowych. To, wydawać by się mogło oczywiste, rozwiązanie wymagało jednak specyficznej implementacji w ramach wykorzystywanej przez Doktoranta metody SFEM oraz opracowania sposobu wymuszenia ciągłości pola przemieszczeń na granicy elementów.

W dalszej części rozdziału Doktorant opisuje wpływ pola temperatury na propagację fal prowadzonych. Na wstępie zaobserwowano, że skala czasu, na której zachodzi zmiana pola temperatury jest znacznie dłuższa niż skala czasowa związana z propagacją fali, dlatego przyjęto założenie, że każdy eksperyment (fizyczny i wirtualny) zachodzi (z dobrym przybliżeniem) w warunkach stałego - choć możliwie innego dla różnych pomiarów - pola temperatury. Jako czynniki związane z polem temperatury wpływające na propagację fal sprężystych w strukturach mechanicznych, Autor podaje rozszerzalność cieplną - zmieniającą wymiary konstrukcji, a zatem również ścieżkę propagacji - oraz zmienność stałych sprężystości i gęstości w funkcji temperatury. Na drodze analizy istotności poszczególnych parametrów (choć odbywa się to jedynie w oparciu o ocenę zakresu zmienności poszczególnych parametrów) pominięte zostały zmiany geometrii na skutek rozszerzalności cieplnej oraz zmiany gęstości w funkcji temperatury.

Na skutek przyjętego modelu zhomogenizowanego dla okładzin kompozytu, wpływ temperatury na poszczególne jego składowe został uwzględniony dla każdego materiału zgodnie z przepisem funkcyjnym zaczerpniętym z literatury. Jak można się domyślić, choć nie wynika to bezpośrednio z tekstu (poza skromnym odwołaniem do literatury), efektywne zależne od temperatury własności kompozytu wyznaczono za pomocą zależnych od temperatury własności materiałów składowych oraz procedury opisanej w załączniku B. Wpływ temperatury został także uwzględniony dla materiału piezoelektrycznego dla parametrów mechanicznych i elektrycznych. W ostatniej sekcji tego rozdziału Autor prezentuje procedurę badania i dostrajania modelu.

W kolejnym rozdziale, zawarto opis spektralnej metody elementów skończonych, wykorzystanej w pracy do modelowania i symulacji propagacji fal prowadzonych w płytach oraz opis nowych rozwiązań opracowanych i zaimplementowanych przez Doktoranta. W szczególności osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie podstaw teoretycznych, implementacja sprzężenia piezoelektrycznego oraz metoda łączenia niedopasowanych siatek elementów skończonych oparta o metodę mnożników Lagrangea.

Szczegóły przygotowanego modelu numerycznego panelu HSC przedstawione zostały w rozdziale 5, gdzie zaprezentowane zostały założenia dotyczące rozmiaru i typu elementów oraz parametry sygnału wymuszającego. W tej części pracy zawarto również założenia i wyniki analiz zbieżności przestrzennej i czasowej dla modelu. Rozdział jest przejrzysty i technicznie dobrze napisany.

Rozdział 6 poświęcono walidacji eksperymentalnej opracowanych modeli. W pierwszej kolejności przedstawiono analizę wykorzystanych w badaniach przetworników piezoelektrycznych w kształcie dysku, jednych z najpopularniejszych i najczęściej stosowanych typów przetworników w badaniach stanu konstrukcji z wykorzystaniem metod ultradźwiękowych. Procedurę walidacji tej części modelu oparto o klasyczny pomiar impedancji. W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki walidacji dla modelu numerycznego panelu kompozytowego, wykorzystując zarówno wyniki w postaci pełnego pola falowego, uzyskane za pomocą wibrometru laserowego, jak również wyniki punktowych pomiarów kontaktowych uzyskanych przy zastosowaniu przetworników piezoelektrycznych.

W rozdziale siódmym opisano sposób wyznaczania MADIF - opartej na modelu funkcji identyfikacji uszkodzenia. W tym celu przeprowadzono szereg symulacji komputerowych – wirtualnych eksperymentów polegających na detekcji i identyfikacji uszkodzenia, a uzyskane sygnały czasowe przetworzono i wykorzystano do obliczenia sześciu wskaźników uszkodzenia. Podobnej procedurze obróbki poddano dane pozyskane z analogicznego eksperymentu fizycznego. Uzyskane wskaźniki, w funkcji wielkości uszkodzenia, poddano analizie i wyłoniono z nich najlepszych kandydatów na MADIF. Podstawowym celem osiągniętym w tym rozdziale jest wykorzystanie modelu numerycznego do określenia funkcji MADIF, która w konsekwencji umożliwi ocenę wielkości uszkodzenia w rzeczywistej strukturze.

Rozdział 8 zawiera wyniki analizy wpływu wybranych parametrów na MADIF. Założeniem przedstawionej analizy jest zbadanie wpływu czynników środowiskowych, głównie temperatury, na zaproponowany sposób oceny wielkości uszkodzenia. Jest to bardzo ważny element przedstawionej pracy, gdyż dotyczy jednego z największych problemów w zagadnieniu

monitorowaniu stanu, mianowicie zmienności wskazań systemu na skutek zmian w otoczeniu, np. temperatury, wilgotności itp. oraz starzenia się komponentów systemu. Bez analizy wpływu tego typu czynników trudno rozważać praktyczne zastosowanie systemu. W rozdziale zawarto wyniki symulacji komputerowych, w których jako zmienne przyjęto wybrane parametry przetwornika piezoelektrycznego oraz elementów składowych kompozytu - warstwy wierzchniej i rdzenia. Jako rozwiązanie problemu zmienności wskazania systemu monitorowania stanu na skutek działania czynników innych niż rozwój uszkodzenia, zaproponowano zastosowanie różnych krzywych MADIF dla różnych temperatur układu. Jest to strategia stosunkowo prosta do realizacji za pomocą dodatkowych elementów sensorycznych systemu.

Podsumowanie pracy, zawarte w rozdziale 9, jest syntetycznym opisem zrealizowanych przez Doktoranta badań oraz wskazaniem kluczowych elementów pracy, wśród których wskazać należy:

- opracowanie modelu panelu HSC z wykorzystaniem pełnej geometrii oraz spektralnej metody elementów skończonych,
- opracowanie rozwiązań łączenia komponentów modelu o niespójnych siatkach elementów skończonych,
- przystosowanie algorytmu całkowania po czasie dla elementów spektralnych do przetwarzania z wykorzystaniem procesorów graficznych,
- wyznaczenie krzywych MADIF dla panelu HSC,
- analiza wpływu pola temperatury oddziałującego na panel HSC na funkcję MADIF.

Uzupełnieniem zasadniczej części pracy są dwa załączniki – pierwszy opisujący sposób wyliczania sił wewnętrznych w modelu w celu przystosowania ich do efektywnego przetwarzania na GPU, drugi zaś zawiera szczegóły obliczania zastępczych parametrów sprężystości dla kompozytu wzmacnianego włóknem węglowym oraz dla rdzenia o strukturze plastra miodu.

Lista referencji – zamieszczona na końcu pracy – składa się ze 118 elementów i znajdują się na niej odniesienia zarówno do klasycznych pozycji książkowych, jak również najważniejszych artykułów naukowych związanych z analizowanym tematem. Należy podkreślić, że lista ta zawiera również odniesienia do najświeższych źródeł (z 2022 r.).

3. Istotność naukowa, główne osiągnięcia pracy oraz ocena merytoryczna

Recenzowana praca dotyczy ciekawych i aktualnych problemów naukowych i aplikacyjnych. W tym kontekście, wskazać należy zagadnienia badań nieniszczących i monitorowania stanu, których zadaniem jest podniesienie poziomu bezpieczeństwa eksploatacji struktur mechanicznych, przede wszystkim infrastruktury krytycznej, statków powietrznych, kosmicznych, a także wielu innych – również mniej odpowiedzialnych – maszyn i urządzeń. Rozwój tych systemów wymaga ciągłego doskonalenia technik pomiarowych pod kątem zapewnienia ich możliwie wysokiej niezawodności i dokładności ich wskazań. W tych wymaganiach mieści się również zdolność systemów monitorowania do rozpoznawania i rozróżniania wpływu warunków środowiskowych – chwilowych i rozłożonych w czasie

eksploatacji – na przykład wpływu starzenia się elementów systemu od rozwoju uszkodzeń, które mogą zagrażać bezpieczeństwu konstrukcji.

Opracowanie i doskonalenie systemów monitorowania stanu, do osiągnięcia wymienionych wyżej celów, wymaga kosztownych i długotrwałych badań eksperymentalnych, w trakcie których analizowany jest wpływ różnych czynników na wskazania systemu. W tym właśnie obszarze upatruję jednego z głównych osiągnięć pracy, której założeniem było wykorzystanie symulacji komputerowych do pozyskania wiedzy o zachowaniu konstrukcji przy założeniu różnego stopnia jej uszkodzenia oraz oddziaływania warunków środowiskowych (tutaj, przede wszystkim, pola temperatury). Podejście takie, o ile skutkuje uzyskaniem wiedzy zgodnej z doświadczeniem, przyczynia się do znacznej redukcji czasu wymaganego do przeprowadzenia badań, obniżenia kosztów ze względu na brak konieczności wytwarzania dużej liczby próbek (o wysokim stopniu podobieństwa), a dzięki temu pozawala na realizację i analizę większej liczby wariantów konfiguracji i warunków brzegowych (i początkowych) badanej struktury. Wykazanie możliwości zastosowania symulacji komputerowych w tym celu oraz dla złożonej struktury kompozytowej, jaką jest badany panel, uważam za cenne z punktu widzenia wykorzystania wyników pracy.

Poza budową modelu numerycznego panelu kompozytowego Doktorant zaproponował jego wykorzystanie do budowy funkcji łączącej stopień uszkodzenia oraz cechy pola falowego. W zamyśle Autora, zastosowanie tej funkcji – zbudowanej przy pomocy modelu na drodze eksperymentów wirtualnych – umożliwi ocenę stanu rzeczywistej konstrukcji podczas jej eksploatacji. Ważną cechą proponowanego rozwiązania jest uwzględnienie zmiennych warunków temperaturowych (choć uwzględnione zostały jedynie zmiany globalne, to zostało to poprzedzone logiczną analizą i uzasadnieniem) oraz jego walidacja eksperymentalna.

Za wartościowe w pracy uważam również rozwiązania w zakresie opracowanych spektralnych elementów skończonych oraz sposobu ich łączenia. Choć opracowane metody bazują na znanych wcześniej rozwiązaniach (jak np. mnożniki Lagrange’a), to ich implementacja wymaga dużej biegłości w zagadnieniach numerycznych i programistycznych, którą Doktorant niewątpliwie się wykazał.

Na uwagę zasługuje również, mniej wyeksponowane w pracy, ale istotne z utylitarnego punktu widzenia przystosowanie i implementacja opracowanych rozwiązań w sposób umożliwiający prowadzenie obliczeń równoległych na procesorach graficznych. Obliczenia z wykorzystaniem GPU nie są nowym obszarem badań (za początek obliczeń równoległych z wykorzystaniem procesorów graficznych można uznać wprowadzenie na rynek technologii CUDA w 2006 roku), jednak intensywnie się rozwijającym i dającym ogromne możliwości. Stworzenie programu umożliwiającego wykorzystanie tych technologii jest niewątpliwie mocną stroną recenzowanej pracy.

4. Ocena strony redakcyjnej

Przystępując do oceny strony redakcyjnej wskazać należy, że praca w sposób przejrzysty przedstawia omawiane zagadnienia, a dyskusja uzupełniona jest ilustracjami ułatwiającymi ich zrozumienie. Rysunki i schematy zawarte w pracy są dobrze opisane. Recenzowana praca jest w

całości napisana w języku angielskim. Pewne, nieliczne zresztą, błędy językowe nie stwarzają trudności w zrozumieniu treści pracy. Praca została przygotowana starannie, zarówno od strony opisowej jak i matematycznej, choć do tej drugiej części mam pewne uwagi i pytania, które znajdują się w kolejnej sekcji niniejszej recenzji.

5. Uwagi ogólne i szczegółowe

Praca przygotowana została – zarówno od strony merytorycznej jak i edycyjnej – w sposób umożliwiający jej dobre zrozumienie oraz prześledzenie toku rozumowania Doktoranta. Poniżej przedstawiłem ogólne i szczegółowe uwagi do poszczególnych rozdziałów pracy.

5.1. Uwagi ogólne

Rozdział 1

We wprowadzeniu do pracy zabrakło, w mojej ocenie, poruszenia następujących kwestii:

- a) Analizy struktury kompozytu typu HSC jako struktury periodycznej, a zatem wykazującej charakterystyczne cechy dynamiczne. Cechy te mogą w sposób znaczący wpływać na dobór technik badawczych i możliwość późniejszego monitorowania tego typu struktur (poprzez np. występowanie pasm silnie tłumionych).
- b) Analizy charakterystyki panelu HSC pod kątem specyfiki fal prowadzonych w nim propagujących, szczególnie w kontekście rodzajów postaci fal (A_0/S_0 i inne). Czy postacie o takiej symetrii będą propagować w asymetrycznej strukturze? Jak wyglądają charakterystyki wzbudzalności i tłumienia (o ile zakłada się tłumienie w materiałach będących składowymi kompozytu)? Silne tłumienie fal krótkich w tego typu strukturach może znacznie utrudniać ich monitorowanie.

Rozdział 2

W rozdziale drugim Autor dokonał syntezy głównych wątków poruszonych w rozdziale pierwszym i na tej podstawie sformułował problem badawczy. Nie mam uwag ogólnych do tego rozdziału.

Rozdział 3

W rozdziale trzecim brakuje nieco przejrzystości:

- a) Nie jest na przykład jasne, które modele podlegają dostrojeniu – najbardziej zasadnym byłoby przyjąć, że są to modele bez uszkodzenia, które są dostrajane do wyników eksperymentu fizycznego, a następnie wprowadzane są do nich uszkodzenia (w

modelu). Wniosek przeciwny sugerowałby, że model nie dostarcza nowej wiedzy na temat interakcji fal z uszkodzeniem, a jest jedynie dostrajany, aby uzyskać wyniki zgodne z eksperymentem fizycznym.

Rozdział 4

Rozdział czwarty wprowadza czytelnika w podstawy „metody elementów spektralnych”, wspomagając zrozumienie dalszych części pracy i opisywanych tam badań i ich wyników. Nasuwają się w związku z tym następujące pytania:

- a) W rozdziale czwartym Autor opisuje de facto metodę elementów skończonych, w której wykorzystywane są wielomiany Legendre’a i w specyficzny sposób dobierane jest położenie węzłów elementu. W efekcie uzyskuje się skupioną macierz mas, która – podobnie do klasycznego podejścia – umożliwia rozprzęgnięcie układu równań i ich przetwarzanie równoległe, co przekłada się na możliwość znacznej redukcji czasu obliczeń. W literaturze funkcjonują jednak dwie metody „spektralne”, które czasami mogą być mylone. Z tego też powodu przyjęło się (choć zasada ta nie zawsze jest przestrzegana), że metodę opisywaną przez Doktoranta określa się jako spektralną metodę elementów skończonych, z ang. SFEM, w odróżnieniu do metody elementów spektralnych, z ang. SEM, w której funkcje kształtu są jawnie zależne od częstotliwości.
- b) Autor opisuje swoją metodę łączenia elementów skończonych typu 3-D i 2-D, jednak nie odnosi się do podobnych problemów i sposobów ich rozwiązania w znanych metodach takich jak np. MES. Czym różnią się metody łączenia tego typu elementów stosowane w MES (np. w rozwiązaniach komercyjnych) i czy mogłyby być wprost zaimplementowane w SFEM? Jakie mogłyby być różnice wynikające ze specyficznej formulacji SFEM?
- c) W rozdziale 4.9 Autor odnosi się do macierzy o dużych rozmiarach oraz problemów związanych z wykonywaniem na nich operacji. Dla problemów liniowych, takich jak w analizowanym w pracy przypadku, efektywne są metody, w których macierzy w ogóle się nie agreguje, ale rozwiązuje problem na poziomie elementów (równoległe), a dopiero odpowiedź modelu rekonstruuje się z tych składowych. Czy tego rodzaju metody były rozważane do rozwiązania problemów analizowanych w ramach rozprawy? Jakie mogłyby być ich zalety i wady w stosunku do tych wykorzystanych w pracy?
- d) W sekcji 4.11 Autor stwierdza, że bez zaproponowanego przez niego elementu pośredniego połączenie elementów 3-D i 2-D byłoby bardzo trudne. Czy możliwe byłoby wykorzystanie klasycznych metod redukcji obciążeń pozawęzłowych do węzłowych i wykorzystanie mnożników Lagrange’a do uzyskania podobnych wyników jednak bez elementów pośrednich? Jakie mogłyby być zalety i wady takiego rozwiązania?

- e) Po przeczytaniu tej części pracy pozostaje pewien niedosyt wynikający z braku porównania proponowanej metody i modelu z klasycznym modelem MES.
- f) Ponadto, w rozdziale brakuje – w mojej ocenie – odnośników wybiegających w przód do materiału, który prezentowany będzie w kolejnych częściach pracy, a są do tego doskonale momenty, które przynajmniej częściowo na tym etapie zaspokoilyby ciekawość czytelnika i zasygnalizowały, że niektóre z uzyskanych wyników zostaną jeszcze wykorzystane i opatrzone komentarzem. Dopiero w kolejnej sekcji zauważyłem rysunki ilustrujące budowany model (rys. 5.2, 5.3 i 5.4).

Rozdział 5

W rozdziale piątym opisano parametry modelu numerycznego, w tym założenia dotyczące jego wielkości, przyjętych elementów oraz sygnału wymuszającego. W tej części pracy zawarto również założenia i wyniki analiz zbieżności przestrzennej i czasowej dla modelu. Rozdział jest przejrzysty i technicznie dobrze napisany. Nasuwające się uwagi i komentarze są następujące:

- a) Autor w rozdziale 5.1 przedstawia założenia dotyczące sygnału wymuszającego, przyjmując, że będzie to sygnał sinusoidalny złożony z pięciu okresów oraz że do jego wyprofilowania amplitudowego zastosowane zostanie okno Hanna. Przyjęto trzy częstotliwości wymuszenia 50, 100 i 150 kHz. Jest to dość powszechny wybór dla cienkich struktur kompozytowych i metalowych. Zastanawia, że wybór ten nie został poprzedzony analizą charakterystyk spektralnych badanego panelu kompozytowego (krzywych dyspersji i krzywych wzbudzalności), które umożliwiłyby odpowiedni dobór długości fali oraz jej postaci do analizowanych uszkodzeń. Powstaje pytanie jakie postaci wzbudzają się i jakie są dominujące dla wybranych częstotliwości wymuszenia oraz jakie mają długości?
- b) W dalszej części rozdziału przedstawiono konfigurację badanego panelu wraz ze szczegółami jego geometrii. Na uwagę – w kontekście powyższych i dalszych uwag – zasługuje kształt rdzenia, który ma kształt heksagonalny. Periodyczność rdzenia – rzędu kilkunastu milimetrów ($h_1 = 11$ mm) – niesie za sobą pewne konsekwencje w kontekście zjawisk falowych. Jednym z efektów, które może on wywołać jest powstawanie pasm zabronionych dla postaci fal, których długość jest podobnego rzędu. Tym bardziej zasadna byłaby analiza charakterystyk spektralnych, która umożliwiłaby ocenę czy tego rodzaju zjawiska mogą zachodzić w badanym elemencie.
- c) Nieco dalej, w tym samym rozdziale, Autor pisze o równoważnym modelu jednorodnym (anizotropowym). Ciekawą byłaby dyskusja o homogenizacji modelu na podstawie reguł innych niż uśrednianie stałych sprężystości, a w analizowanym przypadku oparta o uśrednianie w kontekście ekwiwalentnych własności spektralnych. Należy zwrócić uwagę, że zaproponowany równoważny model jednorodny nie ma możliwości

odwzorowania pasm zabronionych ze względu na brak periodyczności w jego strukturze. Zaproponowane metody homogenizacji są dobre dla zagadnień statycznych jednak mogą prowadzić do błędów w przypadku zjawisk falowych.

- d) W rozdziale 5.5 opisano sposób modelowania uszkodzenia jednocześnie wskazując, że podczas jego fizycznej implementacji doszło do deformacji rdzenia. Jaki jest wpływ rozwarstwienia pomiędzy warstwą wierzchnią i rdzeniem, a jaka deformacji rdzenia na propagację fali? Czy da się wykryć i rozróżnić uszkodzenia tego rodzaju?
- e) W rozdziale zaprezentowano analizę zbieżności – zarówno w odniesieniu do przestrzeni jak i czasu. Jako referencję dla analizy zbieżności w kontekście stopnia wielomianu interpolacyjnego Autor przyjął 11 stopień i do tego wyniku odnosił rezultaty uzyskane w dalszej części pracy. Na jakiej podstawie uznano, że ten stopień jest wystarczająco dokładny, aby był traktowany jako punkt odniesienia? Czy analizowane były wyższe stopnie wielomianów i/lub siatki elementów skończonych o znacznie mniejszych wymiarach?
- f) W tabeli 5.2 zestawiono wielkości elementów skończonych wykorzystanych dla poszczególnych komponentów modelu. Ciekawym byłoby również przytoczenie liczby stopni swobody modelu i odniesienie tych danych do modelu/rozwiązania uzyskanego za pomocą klasycznej formulacji elementów skończonych.
- g) Analiza przedstawiona na stronie 47, odnosząca się do rysunku 5.6 wymaga dyskusji. Jako kryterium zbieżności przyjęto wskaźnik dany równaniem (5.2), który bazuje na obwiedni sygnału czasowego. Wskaźnik ten jest zatem zależny od długości okna i różnicy w sygnałach czasowych pomiędzy symulacjami. Wskaźniki oparte o bezpośrednie porównanie sygnałów czasowych mają wiele wad, jak na przykład dużą wrażliwość na przesunięcia fazowe. Czy zatem z praktycznego punktu widzenia można (czy warto?) rozważyć inne wskaźniki do oceny zbieżności? Dużą różnicę w sygnałach czasowych, a co za tym idzie we wskaźniku (5.2) zauważyć można dla chwil czasowych w pobliżu 200 us. Czy różnica ta mogła wynikać z nakładania się (konstruktywnego) fal odbitych od krawędzi modelu? Wynik ten zdaje się odstawać od innych w sposób znaczący, co potwierdza rys. 5.6b. Jakie może być wyjaśnienie tego specyficznego zjawiska (niemonotonicznego w funkcji stopnia wielomianu interpolującego).
- h) Część poświęcona zbieżności czasowej, a raczej analizie stabilności układu jest dość oczywista i związana z podstawową własnością schematów jawnego całkowania po czasie. Znalazłem tutaj dwie sprawy wymagające komentarza. Autor wskazuje, że krytyczna wielkość kroku czasowego zależy od wielkości siatki (wielkości elementu) oraz postaci fali. To dość kontrowersyjne, ponieważ model powinien być stabilny dla każdej postaci fali. Ponadto nie można zagwarantować, szczególnie w analizie przejściowej, że energia będzie ograniczona do wybranego pasma częstotliwości. Druga

sprawa to przyjęty warunek stabilności. W formie przytoczonej przez Doktoranta jest to przybliżenie jednowymiarowe, dobre jako punkt startowy dla dalszej analizy. Istnieją jednak lepsze dwu- i trój-wymiarowe formuły, których wykorzystanie mogłoby zaoszczędzić Autorowi manualnego poszukiwania optymalnego kroku czasowego dla przeprowadzonych analiz numerycznych.

Rozdział 6

Uwagi natury ogólnej do rozdziału szóstego:

- a) Rozdział 6.1 wymaga wyjaśnienia. Nie jest do końca jasne jakie modele i w jakich konfiguracjach zostały ze sobą zestawione. Autor dokonał analizy charakterystyki częstotliwościowej (impedancyjnej) badanego przetwornika i porównał ją z modelem analitycznym dostępnym w literaturze (równanie (6.2)). Do porównania wykorzystano zapewne dane producenta przetwornika lub – co bardziej prawdopodobne sądząc po zgodności wyników – dopasowano charakterystykę analityczną do eksperymentalnej. Jest to praktyka zgodna z metodologią powszechnie stosowaną w analizie tego rodzaju układów. Warto podkreślić, że zarówno model analityczny jak i procedura analizatora zakłada wykorzystanie sygnału o zmiennej częstotliwości w celu uzyskania charakterystyki wyjściowej (przy czym zwykle stosuje się dość złożony sposób generowania i filtrowania sygnałów, rzadziej wykorzystywany jest wprost sygnał typu „chirp”). W tym kontekście zastanawia, dlaczego w analizie numerycznej przetwornika z wykorzystaniem SFEM zastosowano sygnał zbliżony do szerokopasmowego, o znacznie innej charakterystyce amplitudowej i wykonano analizę przejściową zamiast harmonicznej? W implementacji SFEM zrealizowanej przez autora łatwo byłoby taką procedurę napisać, gdy zagregowane są już macierze K i M. Nieco zastanawiające są rozbieżności pomiędzy uzyskanymi numerycznie charakterystykami częstotliwościowymi, szczególnie gdy istnieje możliwość ich dopasowania w modelu numerycznym do uzyskanej charakterystyki eksperymentalnej.
- b) Opisane w sekcji 6.2 urządzenia firmy Polytec są znane z braku mechanizmu korekcji amplitudy mierzonej fali w związku ze zmianą kąta padania wiązki lasera na badaną powierzchnię. Czy efekt ten został uwzględniony w analizie sygnałów? Czy mógł on mieć wpływ na powstanie rozbieżności pomiędzy punktami pomiarowymi, które są od siebie znacznie oddalone?
- c) Rozmiar przetworników wybranych do badań może być rzędu wielkości długości badanej fali co powoduje destruktywną interferencję i może prowadzić do zmniejszenia czułości sensora. Czy taki czynnik był brany pod uwagę?

- d) Trochę rozczarowuje analiza uzyskanych wyników pełnego pola falowego, gdyż duża część pracy podsumowana jest za pomocą dwóch paragrafów (po 5-6 linijek każdy), a przedstawiony przez Autora materiał wydaje się mieć duży potencjał. Na przykład:
- a) Rysunek 6.7 wskazuje na dużą różnicę w długościach fal pomiędzy modelem FCGM i eksperymentem, a symulacją modelu jednorodnego. Co może być tego powodem?
 - b) Dla wyższych częstotliwości wymuszenia (100 kHz i 150 kHz), poza ogólnie podobnym polem falowym, zauważyć można lokalne periodyczne zaburzenia wynikające z periodycznej struktury rdzenia. To bardzo ciekawe zjawisko, które mogłoby być poddane dokładniejszej analizie.
 - c) Rysunek 6.9 zdaje się potwierdzać bardzo ciekawe własności prowadzenia fal na skutek interakcji z komórkami rdzenia. Być może taka interakcja prowadzi do specyficznych efektów topologicznych, które mogłyby być wykorzystane do opracowania nowych wskaźników uszkodzenia oraz efektywnych metod detekcji i oceny uszkodzenia?
 - d) Podobnie jak w poprzednich porównaniach, warto zwrócić uwagę na znacząco różne od eksperymentalnych i symulacyjnych dla modelu FGCM wyników w zakresie interakcji fali z uszkodzeniem. Te rezultaty są jakościowo różne, co potwierdza bardzo ograniczoną przydatność tego modelu do osiągnięcia celu pracy.
 - e) Jak określono symetrię i antysymetrię postaci w analizie zaprezentowanej na rysunku 6.16 i kolejnych? Kompozyt nie ma płaszczyzny symetrii równoległej do jego powierzchni. Jak w tej sytuacji identyfikowano i porównywano postacie fal dla różnych uszkodzeń modelu?

Rozdział 7

Rozdział siódmy skłania do następujących komentarzy i uwag:

- a) Już w poprzednich rozdziałach pracy wskazano, że model jednorodny nie jest w stanie zreprodukować podstawowych wyników eksperymentów fizycznych. Jaka jest motywacja za jego wykorzystywaniem w dalszej części pracy?
- b) W ramach dyskusji przedstawionej w rozdziale 7.1 pominięto analizę wskaźników wyliczonych na podstawie postaci „ A_0 ” fali dla wymuszenia 150 kHz z powodu jej maskowania przez odbicie wywołane postacią „ S_0 ” (a raczej postaci do nich podobne). Poparcie tego argumentu wymagałoby dokładniejszej dyskusji i analizy. Równie

prawdopodobne jest, że postać ta została silnie wytłumiona ze względu na periodyczną strukturę kompozytu (pasmo zabronione dla tej postaci).

- c) Pomimo braku spełnienia wymaganych przez Autora kryteriów – głównie monotoniczności wskaźników – odrzucony przez Niego zestaw wskaźników oparty o fale wzbudzone na częstotliwości 50 kHz wydają się być najbardziej wrażliwe na uszkodzenie. Czy zatem warto z nich rezygnować, jeśli najwcześniej sygnalizują uszkodzenie konstrukcji (nawet jeśli dla dużych uszkodzeń mogą nie dawać dobrego obrazu jego rozmiaru)?
- d) Kontynuując poprzedni wątek – jakie rozmiary uszkodzenia uważane są za niebezpieczne? Brak takiej dyskusji nie pozwala zorientować się czy wybrane wskaźniki będą wystarczająco czułe na uszkodzenie i odpowiednio wcześnie zasygnalizują jego obecność.

Rozdział 8

Uwagi dyskusyjne i pytania:

- a) W rozdziale brakuje powiązania pomiędzy badanym zakresem zmienności parametrów, a możliwymi rzeczywistymi ich zmianami. Dla przykładu, trudno stwierdzić czy zmiany grubości blachy/folii rdzenia w zakresie 100-300 um są rzeczywistym problemem technologicznym (raczej nie) lub czy zmiany przenikalności dielektrycznej w zakresie 0.8-1.2 wartości bazowej odpowiadają rzeczywistym wahaniom związanym np. ze zmianami temperatury.
- b) Jako rozwiązanie problemu zmienności odczytu systemu monitorowania stanu na skutek działania czynników innych niż rozwój uszkodzenia, zaproponowano zastosowanie różnych krzywych MADIF dla różnych temperatur układu. Jest to strategia stosunkowo prosta do realizacji praktycznej za pomocą dodatkowych elementów sensorycznych systemu. Ciekawą obserwacją z wyników przedstawionych dla krzywych MADIF w tabeli 8.1 jest brak monotoniczności parametrów w funkcji temperatury. Jak można to interpretować?
- c) Zastanawiająca jest rozbieżność wyników dla temperatur poniżej 10⁰C (rys. 8.1). Obserwując dobrą zgodność dla wszystkich pozostałych rezultatów, jaki czynnik może wpływać na taki obraz? W jaki sposób można go zidentyfikować?
- d) Bardzo ciekawa jest analiza przedstawiona na rys. 8.3 zważywszy, że rozmiar przetwornika jest rzędu wielkości komórki elementarnej. W jaki sposób postać fali prowadzonej (zdeformowanej przez komórkę rdzenia) może wpływać na odczyt sensora?

- e) Na rysunku 8.3 dla postaci „A₀” dla scenariusza 5 i 6 – które wydają się topologicznie podobne – zaobserwować można, że amplitudy fali są skrajnie różne. Co może być tego powodem?
- f) Na rysunku 8.4 wyniki układają się monotonicznie w funkcji zmiany stałej piezoelektrycznej poza wykresem dla 80%, który znajduje się w środku. Czy może to być pomyłka w podpisie? Jeśli nie, to jaka może być przyczyna takiego stanu rzeczy (wszystkie krzywe są równo odległe od siebie)?
- g) Wyniki przedstawione na rysunkach 8.12 i 8.13 ilustrują MADIF dla paneli kompozytowych z jedną i dwoma okładzinami. Jednocześnie Autor konkluduje, że oszacowany MADIF dla jednego przypadku może się sprawdzić dla innych. Jakie argumenty mogą poprzeć tę tezę?
- h) W rozdziale pokazano, że amplitudy niektórych postaci fal mogą różnić się aż o 25% (i więcej – nawet 100%) przy zmianie parametrów materiału. Tak duże zmiany mogą z łatwością przewyższyć te obserwowane przy powstaniu uszkodzenia. Jak Autor ocenia możliwość praktycznej implementacji zaproponowanego podejścia w tych warunkach? Czy pomiar temperatury będzie wystarczający dla zapewnienia poprawnej pracy systemu monitorowania? Innymi słowy – czy niewielka zmiana temperatury i związana z nią niepewność – może skutkować brakiem możliwości wykrycia i oceny uszkodzenia?

5.2. Uwagi szczegółowe

Rozdział 1

- a) W niektórych miejscach rozdziału Autor odnosi się do uszkodzeń w sposób nieprecyzyjny, używając zamiennie pewnych sformułowań np. „damage” i „flaw”. Część z tych określeń w nomenklaturze angielskojęzycznej posiada precyzyjne znaczenie odnoszące się do konkretnego rodzaju uszkodzenia i/lub jego geometrii i nie powinno być używane do ogólnego określenia uszkodzenia.
- b) Na stronie 4 Autor opisując zjawisko piezoelektryczne użył niefortunnego sformułowania „...the generated charge is proportional to the strain and the direction of polarization.” - naturalnie, ilość ładunku (elektrycznego) jest w tym przypadku związana z polaryzacją, ale trudno określić relację proporcjonalności. Ewentualnie do czego należałoby ją odnieść?

- c) Od samego początku pracy Autor używa określenia „PZTs” jako alternatywy dla „piezoelectric transducers” (str. 4), tłumacząc swój wybór faktem, że większość przetworników piezoelektrycznych wykonana jest z tytanianu cyrkonianu ołowiu. Choć nie zmienia to rozumienia treści pracy oraz jest powszechną praktyką nawet w środowisku naukowym, to wykorzystywanie tego „zamiennika” ogranicza się jednak do mniej formalnych materiałów i dyskusji. Co do zasady przetworniki piezoelektryczne mogą być wykonane z różnych materiałów, nie tylko PZT.
- d) Na stronie 5 opisując metody inspekcji oparte o płytowe fale prowadzone Autor charakteryzuje ich dominujące składowe przemieszczenia (w kierunku prostopadłym do powierzchni płyty) wskazując, że postacie podstawowe, tj. A_0 i S_0 , wykazują dominującą składową – odpowiednio – prostopadłą i równoległą do powierzchni płyty. W rzeczywistości taki opis jest prawdziwy jedynie dla relatywnie niskich częstotliwości (poniżej pierwszej częstotliwości odcięcia), gdyż później charakter pól przemieszczeń tych dwóch postaci ulega silnej zmianie (zamianie).
- e) W tym samym paragrafie Doktorant odnosi się do postaci wyższych rzędów jako „higher harmonic modes” zamiast „higher order modes”.
- f) Na stronie 6 opisując metodę „time-reversal”, Autor krótko nawiązuje do odwrócenia w czasie i kompensacji dyspersji, aby po ponownej propagacji uzyskać sygnał, który został nadany w źródle. Opisywana procedura nie może jednak odtworzyć sygnału wymuszającego w źródle, ze względu na opisaną wcześniej pośrednią kompensację dyspersji.
- g) Na końcu sekcji 1.5 Autor odnosi się do skrócenia czasu obliczeń 14-krotnie dzięki zastosowaniu przetwarzania równoległego na kartach graficznych w porównaniu z rozwiązaniem analogicznego zadania z wykorzystaniem klasycznych procesorów. Należy jednak pamiętać, że możliwość redukcji czasu obliczeń zależy przede wszystkim od rodzaju rozwiązywanego zadania. Niektóre algorytmy, jak np. LISA czy MES wykorzystujący jawne całkowanie po czasie ze skupioną macierzą mas rozbity na operacje elementarne, pozwalają uzyskać przyspieszenia rzędu 1000 razy, lecz w innych zagadnieniach (np. MES z wersji z całkowaniem niejawnym) może wykazywać dużo gorsze własności (włącznie ze spadkiem wydajności).

Rozdział 2

Nie mam uwag szczegółowych do tego rozdziału.

Rozdział 3

Lektura rozdziału 3 motywuje do zadania następujących pytań szczegółowych:

- a) Jakie inne kryteria, poza równoważnością w ujęciu statycznym, mogłyby być wartościowe dla celu określenia równoważnych własności modelu (np. bazujące na porównaniu charakterystyk spektralnych)?
- b) Autor wspomina o dyssypacji energii w komórkach rdzenia, jednak nie ma tutaj informacji o ewentualnym tłumieniu? Czy chodzi o rozpraszanie fali na tych elementach struktury? Jeśli tak, to energia ta pozostaje w strukturze i najpewniej przyczyni się do powstania złożonych postaci fal prowadzonych.
- c) W rozdziale nie podano szczegółów dotyczących aktualnego stanu wiedzy w zakresie wykorzystania dwuwymiarowych elementów spektralnych – czy wykorzystano klasyczne sformułowanie płytowe?
- d) Nie jest jasne co Autor rozumie poprzez wprowadzenie szóstego stopnia swobody do – jak można zrozumieć z opisu na stronie 14 – klasycznego elementu objętościowego. Ten ostatni element ma zwykle jedynie trzy przemieszczeniowe stopnie swobody. Jakie są zatem stopnie czwarty i piąty?
- e) Czy do oceny istotności poszczególnych parametrów, jak np. gęstość, wykorzystano metodę oceny wrażliwości, a jeśli tak to jaką?
- f) Jakie przesłanki stoją za wyborem tłumienia jako parametru dostrajanego, aby zbliżyć wyniki symulacji do wyników eksperymentu (sekcja 3.3)?
- g) Proszę uszczegółowić procedurę dostrajania modelu – dla jakich konfiguracji panelu była ona realizowana (uszkodzone/nieuszkodzone)?

Rozdział 4

W rozdziale czwartym zawarto opis głównego narzędzia numerycznego wykorzystanego w pracy. Duża liczba równań wymagała od Autora biegłości w posługiwaniu się aparatem matematycznym opartym o algebrę macierzową i rachunek tensorowy. Nie sposób w takim przypadku uniknąć drobnych błędów czy niejasności, choćby w odniesieniu do spójności i notacji równań, które często pochodzą z różnych źródeł. W kontekście tego rozdziału nasuwają się następujące uwagi:

- a) Na stronie 21 zawarto niefortunne zdanie: „...external forces and arbitrary boundary conditions...” podczas gdy siły zewnętrzne również wprowadzane są jako warunki brzegowe (naturalne).

- b) Na stronie 22 Doktorant stwierdza, że jedną z głównych zalet prezentowanej metody jest szybka zbieżność równania ruchu – co Autor ma na myśli?
- c) W jaki sposób sformułowano równania (4.20) i (4.21) i przy jakich założeniach?
- d) Co miał na myśli Autor poprzez sformułowanie „open circuit sensor” zaraz po równaniu (4.28)? O jaką konfigurację części elektrycznej modelu chodzi?
- e) Opis w sekcji 4.6 jest nieco niejasny – pojawia się tam informacja, że przy łączeniu elementów trójwymiarowych z płaskimi nie można połączyć ich węzłów, ponieważ elementy płaskie (tutaj – płytowe) umiejscowione są na powierzchniach środkowych. Zagadnienie takie można rozwiązać poprzez tzw. offset lub dedykowaną formułę elementu. Pomocny byłby schemat modelu.
- f) W jaki sposób sformułowano elementy płytowe i w jaki sposób rzutują one na możliwość reprezentacji fal typu A i S w warstwie górnej kompozytu?
- g) W równaniu (4.34) pojawia się macierz G – wydaje się, że w tym zapisie będzie ona zawierała jedynie funkcje kształtu? Tak zdaje się sugerować opis na stronie 30.
- h) Na stronie 29 zawarto informację o dwóch wektorach na płaszczyźnie mających ten sam kierunek. Jednak taka sytuacja będzie miała miejsce jedynie wtedy, gdy będą równoległe. Czy taki był zamysł?
- i) W sekcji 4.6 opisano algorytm wyszukiwania węzłów – czy próbowano stosować metody znane np. z algorytmów Delaunay’a lub inne standardowe rozwiązania? Jaka jest przewaga zastosowanego rozwiązania w stosunku do nich?
- j) Końcowy fragment sekcji 4.7 Autor poświęcił procedurze diagonalizacji macierzy. Czy Doktorant porównywał wykorzystaną metodę z innymi znanymi metodami, np. metodami sumowania po wierszach?
- k) Na stronie 38 przedstawiono dwa problemy modelowe, w których w jednym zagęszczano siatkę elementów (zmniejszając ich wymiary), a w drugim zwiększano rozmiar płyty przy zachowaniu rozmiaru elementu. Jaka jest jakościowa różnica pomiędzy tymi dwoma problemami testowymi?
- l) Opis na stronie 38 – w zakresie uzyskanych wyników – nie jest do końca jasny bez wyjaśnienia co było „benchmarkiem”.
- m) W rozdziale zawarto dużą liczbę równań, stąd prawdopodobnie niektóre z omyłek i nieścisłości:

- a) w równaniu (4.5) wektor węzłowych sił zewnętrznych oznaczono przez f_{ext} , podczas gdy w opisie znajduje się odniesienie do F_{ext} ,
- b) pochodna w równaniu (4.5) powinna być pochodną zwyczajną, nie cząstkową,
- c) w rozdziale niespójne wydaje się oznaczenie wektorów i macierzy, np. w równaniach (4.6), (4.7), (4.8) itd. użyto nawiasów wąsowych do określenia wektorów, podczas gdy w równaniach (4.17), (4.18) itd. użyto nawiasów kwadratowych,
- d) Autor wydaje się stosować zasadę wytłuszczania symboli wielkości wektorowych i macierzowych, lecz niekonsekwentnie, co czasami utrudnia analizę równań, np. w równaniu (4.13),
- e) w niektórych miejscach błędnie wykorzystano zmienne węzłowe, np. w równaniu (4.8) (i kilku kolejnych) błędne wydaje się odniesienie do pochodnych zmiennych węzłowych – pochodne te nie mogą być obliczone ze względu na fakt, iż zmienne węzłowe z definicji nie są funkcjami zależnymi od zmiennych przestrzennych. W konsekwencji, niektórych operacji macierzowych nie dałoby się wykonać.
- f) niektóre zmienne są nieopisane (np. c_{ij} na stronie 24), innym brakuje informacji o ich wymiarze – dla przykładu wydaje się, że zmienna u_0^e jest wektorem kolumnowym o liczbie komponentów równej liczbie węzłów elementu, ale nie wynika to z tekstu.
- g) zmienna c w równaniu (4.16) wydaje się być macierzą, jednak opisana jest jako tensor. Czy zmienna ta ma związek z wcześniejszą zmienną c_{ij} ?
- h) w równaniu (4.17) znajduje się odniesienie do wektora naprężenia, jednak nie jest on precyzyjnie opisany,
- i) nie jest jasne jak wykonać operacje w równaniu (4.18) – jeśli $\hat{\phi}^e$ jest wektorem, to mnożenie przez drugi wektor kolumnowy nie jest możliwe,
- j) na stronie 26 podano dwie – różne – definicje wektora $\hat{\phi}^e$ – w pierwszej linijce jako wektora napięcia, później jako wektora zawierającego potencjał elektryczny w węzłach,
- k) według równania (4.22) $\hat{\phi}$ byłby dwuwierszową macierzą (dwa wektory kolumnowe i transpozycja) – czy taki był zamysł?

- l) podobne wnioski mogą dotyczyć wektora $\hat{d}$ (jego definicji nie znalazłem) – jest on lewostronnie mnożony przez macierz złożoną z liczby wierszy równej sumie elementów w wektorach a i b ,
- m) nie znalazłem definicji $\hat{\phi}$ jednak wnioskując z równania (4.19) powinien on być jednokolumnowym wektorem o liczbie elementów równej sumie komponentów wektorów a i b . Jeśli rzeczywiście odnosi się on do zmiennych węzłowych, nie jest jasne całkowanie w równaniu (4.31).
- n) jak poprzednio wskazano, nie jest do końca jasne jakie wymiary mają poszczególne zmienne wektorowe i macierzowe. Z porównania równań (4.38) i (4.39) można wysnuć sprzeczne wnioski. Dodatkowo, nie da się wykonać mnożenia w równaniu (4.39) przy przyjętym założeniu odnośnie kosinusów kierunkowych.

Rozdział 5

Szczegółowe uwagi i pytania dotyczące rozdziału piątego:

- a) Na rys. 5.1 na osi pionowej podano napięcie jednak założono jego bezwymiarowość – czy chodziło o przedstawienie napięcia znormalizowanego?
- b) W sekcji 5.5 podano szerokość analizowanego defektu równą zero – czy chodzi o sytuację, w której model nie jest uszkodzony, czy wprowadzony został defekt liniowy (tzw. „zduplikowane” węzły)?
- c) Proszę o komentarz odnośnie analizy przedstawionej na stronie 47 dotyczącej propagacji fali w warstwie wierzchniej panelu, tj. w kompozycie CFRP. Kompozyt ten jest przecież połączony z rdzeniem, który w sposób znaczący wpływa na propagację fal sprężystych.
- d) Warunek CFL odnosi się do stabilności, która pośrednio świadczy o zbieżności w metodach różnicowych (nie jest bezpośrednim i jedynym warunkiem zbieżności)

Rozdział 6

Uwagi techniczne:

- a) Na stronie 56 pojawia się informacja o modelowanych defektach, jednak inna niż wcześniej (por. sekcja 5.5).

- b) Czy wynik podany w tabeli 6.2 dla postaci S_0 przy częstotliwości wymuszenia 50 kHz (12 mV) jest poprawny? Podobnie w tabeli 6.3 dla tej postaci i częstotliwości wymuszenia.

Rozdział 7

Wobec opracowanych krzywych MADIF pojawia się pytanie:

- a) W jaki sposób użyte techniki przetwarzania sygnałów – szczególnie procedury filtracji – wpływają na zdolność oszacowania rozmiaru uszkodzenia za pomocą MADIF?

Rozdział 8

Uwagi szczegółowe:

- a) W sekcji 8.2.1 nie jest jasne czy zmieniano pozycję sensora w trakcie pomiarów? (Ostatnie zdanie pierwszego paragrafu tej sekcji wskazuje, że tak, jednak przedostatnie zdanie na stronie 89 zdaje się temu przeczyć.)

6. Wniosek końcowy

Podsumowując recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Fiborka stwierdzam, że zawarte w niej badania i ich pracowanie stanowią rozwiązanie istotnego i oryginalnego problemu badawczego, związanego z analizą propagacji sprężystych fal prowadzonych w złożonych konstrukcjach mechanicznych oraz ich wykorzystania do wykrywania uszkodzeń. Tym samym praca wpisuje się w aktualne i ważne, także z utylitarного punktu widzenia, trendy i obszary badawcze i przemysłowe.

Przedłożoną do recenzji pracę oceniam jednoznacznie pozytywnie. Podczas przygotowywania pracy Doktorant wykazał się wiedzą z zakresu szeroko pojętej dynamiki, w szczególności w zakresie dynamiki zjawisk przejściowych, tj. zagadnień teoretycznych związanych z propagacją fal sprężystych, analizy numerycznej i symulacji, metod pomiarowych – zarówno kontaktowych i bezkontaktowych oraz metod obróbki i analizy wyników. W tym aspekcie należy podkreślić dużą biegłość Doktoranta w doborze i zastosowaniu wymienionych wyżej metod i narzędzi, która pozwoliła Mu osiągnąć postawione cele pracy.

Sformułowane przeze mnie uwagi krytyczne i szczegółowe nie umniejszają w żadnym stopniu wartości i mojej wysokiej oceny recenzowanej rozprawy.

Z formalnego punktu widzenia stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca spełnia wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim wynikające z Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz. U. z 2014 r., poz. 1852 ze zm.). W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony Jego rozprawy doktorskiej.

