

Dr hab. inż. Magdalena Rucka
Katedra Mechaniki Budowli
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: mrucka@pg.gda.pl
tel.: (58) 347 24 97

Gdańsk, 15.05.2015

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Suwały
pt. „Nieparametryczna metoda identyfikacji zmian masy i sztywności konstrukcji”

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest pismo Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN dr. hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego, prof. IPPT PAN z dnia 11 marca 2015 r. i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr. inż. Grzegorza Suwały pt. „*Nieparametryczna metoda identyfikacji zmian masy i sztywności konstrukcji*”, wykonana pod kierunkiem dr. hab. inż. Łukasza Jankowskiego.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy tematyki identyfikacji zmian masy i sztywności konstrukcji z użyciem nieparametrycznego modelu konstrukcji referencyjnej oraz metodologii metody dystorsji wirtualnych. Praca jest napisana w języku polskim. Dysertacja liczy 139 numerowane strony formatu A4 i składa się z 7 rozdziałów: (1) *Wstęp*, (2) *Modelowanie zmian masy i sztywności konstrukcji*, (3) *Identyfikacja zmian masy i sztywności konstrukcji*, (4) *Sformułowanie w dziedzinie Laplace'a*, (5) *Techniki numeryczne*, (6) *Weryfikacja doświadczalna*, (7) *Zakończenie*, poprzedzonych *Spisem treści* oraz *Wykazem oznaczeń* oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim. *Bibliografia* obejmuje 171 pozycje literatury. W pracy zamieszczono 169 wzorów, 31 rysunków oraz 17 tablic, numerowanych w ramach rozdziałów.

3. Treść rozprawy

W Rozdziale 1 (*Wstęp*) Autor dokonuje klasyfikacji metod monitorowania stanu technicznego konstrukcji, a następnie omawia poszczególne grupy metod. Na tym tle Autor określa cel i zakres pracy.

Rozdział 2 (*Modelowanie zmian masy i sztywności konstrukcji*) przedstawia teoretyczne sformułowanie metody modelowania nieparametrycznego w dziedzinie czasu. W rozdziale omówiono także koncepcję pseudo obciążenia równoważnego zmianom masy i sztywności, koncepcję doświadczalnej macierzy wpływu oraz opis modelowania obciążenia niesprężystego.

W Rozdziale 3 (*Identyfikacja zmian masy i sztywności konstrukcji*) zawarto metodologię rozwiązania problemu odwrotnego identyfikacji zmiany masy i sztywności oraz omówiono najczęściej stosowane metody analizy wrażliwości. W rozdziale tym przedstawiono także

szczegółową analizę wrażliwości pierwszego i drugiego rzędu dla zadania z czasem ciągłym i czasem dyskretnym.

Rozdział 4 (*Sformułowanie w dziedzinie Laplace'a*) zawiera sformułowanie opracowanej metody nieparametrycznego modelowania i identyfikacji w dziedzinie Laplace'a. W tej części pracy wyprowadzono również zależność na pseudo obciążenie oraz sformułowano problem odwrotny identyfikacji zmian masy i sztywności, a także zaproponowano metodę jego rozwiązania przy użyciu procedur optymalizacyjnych.

Rozdział 5 (*Techniki numeryczne*) opisuje techniki numeryczne niezbędne dla rozwiązania opracowanej metody oraz analizy danych eksperymentalnych. W rozdziale omówiono klasyfikację i wybrane właściwości liniowych równań całkowych oraz rozkład macierzy według wartości osobliwych. Następnie opisano metody regularyzacji wraz z analizą ich cech charakterystycznych, zalet i wad, a także sposób optymalnego doboru parametrów regularyzujących.

W Rozdziale 6 (*Weryfikacja doświadczalna*) przedstawiono wyniki weryfikacji doświadczalnej zaproponowanej przez Autora nieparametrycznej metody identyfikacji zmian masy i sztywności konstrukcji. W pierwszej części rozdziału opisano badaną konstrukcję i stanowisko doświadczalne oraz sposoby modyfikacji masy, sztywności i uderzeń niesprężystych. Następnie zaprezentowano wyniki identyfikacji wybranych parametrów w dziedzinie czasu i w dziedzinie Laplace'a.

Rozdział 7 (*Zakończenie*) zawiera podsumowanie pracy oraz ogólne wnioski końcowe z przeprowadzonych analiz i badań doświadczalnych.

4. Ocena rozprawy i uwagi krytyczne

Tematyka rozprawy dotyczy ważnego zagadnienia oceny i monitorowania stanu technicznego konstrukcji inżynierskich. Wykrywanie i lokalizacja uszkodzeń konstrukcji i ich składowych elementów na bazie statycznej bądź dynamicznej odpowiedzi jest tematem intensywnych badań naukowych od kilkadziesiąt lat. Pomimo to tematyka detekcji uszkodzeń jest wciąż aktualna w literaturze krajowej i zagranicznej. Pojawiają się nowe metody oraz nowe zastosowania dla już istniejących metod. Na szczególną uwagę zasługuje grupa metod nieparametrycznych, które nie wymagają parametrycznego modelu monitorowanej konstrukcji wykonywanego w procesie wielostopniowej kalibracji.

Głównym celem pracy było opracowanie niskoczęstotliwościowej metody identyfikacji zmiany masy i sztywności konstrukcji oraz parametrów uderzenia idealnie niesprężystego, a także jej eksperymentalna weryfikacja z wykorzystaniem modelu stalowej konstrukcji typu kratowego. Zaproponowana metoda została sformułowana w dziedzinie czasu oraz dziedzinie Laplace'a. Wykorzystuje ona nieparametryczny model konstrukcji referencyjnej w postaci zbioru jej odpowiedzi zarejestrowanych w wybranych punktach konstrukcji. Identyfikację zmian masy i sztywności przeprowadzono w procesie rozwiązania zagadnienia odwrotnego w postaci zadania optymalizacyjnego. Opracowana metoda może posłużyć do monitorowania zmian parametrów masowych i sztywnościowych wybranych elementów składowych konstrukcji referencyjnej.

Uwagi ogólne, wybrane uwagi szczegółowe oraz pytania są przedstawione w poniższych punktach.

Uwagi i pytania do treści rozprawy

- 1) W grupie metod lokalnych monitorowania stanu technicznego konstrukcji (str. 10-11) Autor wymienia metodę wykorzystującą propagację fal Lamba. W tym miejscu należałoby podkreślić dwie cechy odróżniające metodę fal prowadzonych od klasycznej defektoskopii ultradźwiękowej. Po pierwsze, metoda propagacji fal Lamba powinna być zaliczona do metod globalnych. Metoda fal Lamba umożliwia identyfikację uszkodzeń znajdujących się w znacznej odległości od czujników, a za jej pomocą można monitorować całą konstrukcję lub jej składowe elementy. Po drugie, zakres częstotliwości w przypadku metody fal Lamba jest węższy niż w technice ultradźwiękowej i zazwyczaj zawiera się, w zależności od wymiarów konstrukcji, w przedziale od kilkudziesięciu do kilkuset kHz.
- 2) Na str. 31 Autor napisał, że bezpośrednio zbudowanie macierzy wpływu ze zmierzonych odpowiedzi konstrukcji na obciążenie w formie impulsu przykładanego za pomocą młotka modalnego doprowadziłoby do uzyskania błędnych wyników. W praktycznej realizacji wymuszenia za pomocą młotka modalnego szerokość eksperymentalnie przykładanego do konstrukcji obciążenia impulsowego można regulować zmieniając rozmiar i twardość końcówki. Czy możliwe jest takie dobranie szerokości impulsu (zwięźlenie), by możliwe było bezpośrednio zbudowanie macierzy wpływu ze zmierzonych odpowiedzi bez powodowania znaczących błędów w rozwiązaniu?
- 3) Badany doświadczalnie dźwigar nie powinien być nazywany wspornikiem (str. 83), ponieważ sposób jego podparcia opisany w punkcie 6.1.1 (łożyska przesuwne na prawym końcu dźwigara) wskazuje, że konstrukcja pracuje w układzie swobodnego podparcia.
- 4) Opis stanowiska pomiarowego i badanej konstrukcji jest zbyt pobieżny lub wprowadza niejednoznaczności w interpretacji:
 - w punkcie 6.1.1 brakuje zdjęć przedstawiających podpory badanego dźwigara oraz szczegóły wykonania węzła;
 - str. 84 – w jaki sposób zrealizowano mocowania odważników do węzłów badanej konstrukcji?
 - str. 84-85 – na rys. 6-2 zaznaczono położenie akcelerometru mierzącego odpowiedź $\ddot{u}^M(t)$ konstrukcji zmodyfikowanej. Gdzie mierzono przyspieszenie konstrukcji referencyjnej?
 - str. 87 – brakuje zdjęcia przedstawiającego szczegół zamocowania ekstensometru;
 - na str. 88 napisano, że każdy pomiar powtarzano czterokrotnie, a odpowiedzi uśredniano w celu zmniejszenia efektów szumu pomiarowego. Obciążenie impulsowe z racji sposobu jego przykładania zapewne różniło się w poszczególnych próbach zarówno amplitudą, jak i w pewnym zakresie również kształtem, zatem zarejestrowane przyspieszenia nie były sobie równoważne. W jaki więc sposób dokonywano uśredniania sygnałów?
 - str. 89 – wykres przedstawiony na rys. 6-6 wbrew podpisowi pod rysunkiem najprawdopodobniej nie przedstawia typowego przebiegu czasowego wymuszenia młotkiem modalnym. Typowy pomierzony impuls najczęściej zawiera na swoim końcu tzw. *ringing effect* oraz szum pomiarowy w fazie drgań swobodnych.

- 5) Weryfikację doświadczalną przeprowadzono na sygnałach przemieszczeń uzyskanych na drodze całkowania pomierzonych przyspieszeń drgań. Pomiar przyspieszeń jest najbardziej powszechnym (i najtańszym) sposobem pomiaru drgań. Nie każdy jednak system pomiarowy posiada wbudowaną opcję sprzętowego całkowania sygnałów, a całkowanie numeryczne jest obciążone błędem przybliżenia. Dlaczego w przykładach doświadczalnych nie zastosowano przebiegów czasowych drgań zarejestrowanych wprost przez akcelerometry?
- 6) Dlaczego zastosowano tylko jeden pomiarowy czujnik przyspieszeń? Czy zastosowanie kilku akcelerometrów polepszyłoby wyniki identyfikacji zmiany masy/sztywności?
- 7) W przeprowadzonych doświadczeniach z góry założono, w którym węźle może się znajdować dodatkowa masa (rozważano 1, 2 lub 3 węzły), podczas gdy konstrukcja posiada aż 22 swobodne węzły. Podobnie w przykładzie z identyfikacją modyfikacji sztywności z góry założono, że zmiana sztywności osiowej może wystąpić w jednym elemencie. W przeprowadzonej weryfikacji doświadczalnej opracowana metoda nie jest więc zastosowana jako monitoring całej konstrukcji, ale jej wybranego węzła (lub 2 czy też maksymalnie 3 węzłów) w przypadku identyfikacji masy czy też jednego pręta w przypadku identyfikacji sztywności. Jest to znaczące ograniczenie zaproponowanej metody, bowiem w rzeczywistej sytuacji monitorowania stanu technicznego konstrukcji nie powinno się z góry zakładać, w którym jej elemencie wystąpi uszkodzenie.
- 8) W przykładzie identyfikacji masy w dziedzinie czasu, identyfikacja pojedynczej masy została wykonana z maksymalnym błędem względnym wynoszącym 7.2%. Jest to akceptowalna dokładność jak na weryfikację doświadczalną. Jednak skuteczność metody przy identyfikacji pojedynczej masy (tzn. jednej niezerowej, drugiej zerowej), ale w dwóch możliwych położeniach jest niewielka, gdyż uzyskany błąd wynosi do ok. 150% (poz. 9 z Tabeli 6.8). Wyniki uzyskane w dziedzinie Laplace'a charakteryzują się większą dokładnością (maksymalny błąd wyniósł ok. 17%). Ile wynosi błąd oszacowania pojedynczej masy przy założeniu, że może ona wystąpić w każdym z 22 węzłów?
- 9) Identyfikacja redukcji sztywności pojedynczego elementu również charakteryzuje się znacznymi błędami dochodzącymi do 112% w dziedzinie czasu i 61% w dziedzinie częstotliwości. Ile wynosi błąd oszacowania zmiany sztywności przy założeniu, że może się ona zmienić w każdym z 70 prętów?
- 10) W wyniku przeprowadzonej identyfikacji modyfikacji masy, niektóre z mas zostały zidentyfikowane jako ujemne, jako efekt zastosowania optymalizacji funkcji celu bez ograniczeń. Dlatego Autor przeprowadził w drugim etapie obliczeń optymalizację z fizycznymi ograniczeniami w postaci wymagania nieujemności identyfikowalnych mas odważników. W przypadku rzeczywistej konstrukcji masa może ulec zwiększeniu, na przykład na skutek dodatkowego obciążenia, ale może też ulec zmniejszeniu, na przykład na skutek korozji. Wprowadzenie warunku o nieujemności identyfikowalnych mas odważników uniemożliwia identyfikowanie zmniejszenia masy konstrukcji.
- 11) Autor przeprowadził weryfikację zastosowanej metody wyłącznie na danych uzyskanych doświadczalnie, które są obciążone szeregiem niepewności. Wyniki uzyskanej identyfikacji są w wielu przypadkach niezadawalające z uwagi na dużą rozbieżność pomiędzy wartościami rzeczywistym a identyfikowanymi. Według recenzenta etap badań doświadczalnych powinien być poprzedzony wykonaniem tzw.

eksperymentu numerycznego, w którym pozyskano by sygnały z modelu MES badanej konstrukcji. Pozwoliłoby to na uzyskanie informacji o skuteczności działania opracowanej metody w przypadku różnych typów konstrukcji (np. ramowa, płytowa, itp.) i różnych scenariuszy modyfikacji (np. zmniejszenie masy, różne typy uszkodzenia, itp.).

- 12) W *Zakończeniu* rozprawy Autor zaleca aby opracowaną metodę stosować do obiektów o konstrukcji kratowej tłumacząc, iż występują trudności techniczne związane z pomiarem kątów obrotu oraz realizacją wymuszeń momentowych. Poddany badaniom doświadczalnym dźwigar kratowy został wykonany w postaci elementów mocowanych do węzłów typu kulowego. Rozwiązanie to w pewnym zakresie imituje połączenie przegubowe w węzłach. Elementy rzeczywistych konstrukcji inżynierskich o charakterze kratowym (np. dźwigarów mostowych) często są połączone w węzłach za pomocą blach węzłowych, co uniemożliwia realizację swobodnych obrotów jak w idealnych przegubach. Czy można zastosować opracowaną metodę do monitorowania konstrukcji z węzłami sztywnymi?

Język i redakcja rozprawy

Pod względem redakcyjnym rozprawa jest opracowana bardzo starannie. Przyjęty podział pracy na siedem rozdziałów jest logiczny i przejrzysty. Uchybienia zauważone przez recenzenta są znikome i nie mają znaczenia dla pozytywnej oceny całości pracy.

Wybrane uwagi szczegółowe:

- str. 14/⁵ – jest: „bezpośrednią informację”, powinno być: „bezpośrednią informację”;
- str. 14/⁹ – jest: „korelacje”, powinno być: „korelację”;
- str. 14/15 – „... nawet w przypadku zastosowania dużej liczby pomiarów” – nieprecyzyjne sformułowanie;
- str. 15/¹ – jest: „występuje największą wartość różnicy”, powinno być: „występuje największa wartość różnicy”;
- str. 16/18 – jest: „opublikowali uaktualniona wersję pracy”, powinno być: „opublikowali uaktualnioną wersję pracy”;
- str. 19/⁶ – jest: „problem związany z identyfikacją”; powinno być: „problem związany z identyfikacją”;
- str. 40/⁸ – jest: „obliczenie $\Delta F(\mu)$ metoda”; powinno być: „obliczenie $\Delta F(\mu)$ metodą”;
- str. 60/9 – jest: „Metoda ta oblicza pochodną pseudo obciążenia występująca w ...”, powinno być: „Metoda ta oblicza pochodną pseudo obciążenia występującą w ...”;
- str. 74/16 – „zdyskretyzowanym” – błąd w pisowni słowa „zdyskretyzowanym”;
- wykaz oznaczeń jest niekompletny – brak wyjaśnienia niektórych oznaczeń np.: x (str. 28), N (str. 30), n (str. 30).

5. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska świadczy o umiejętności samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych przez jej Autora. Autor przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a także wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie metod numerycznych, mechaniki i dynamiki konstrukcji oraz umiejętnością prowadzenia badań doświadczalnych. Zasadnicze założenia pracy zostały zrealizowane. Przedstawione powyżej uwagi krytycznie nie obniżają w istotny sposób wartości merytorycznej pracy. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę „*O stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki*” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku) i dlatego **stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr. inż. Grzegorza Suwały do publicznej obrony.**

Magdalena Fucker