

Dr hab. inż. Krzysztof Mendrok  
Katedra Robotyki i Mechatroniki  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

Kraków, 09.05.2015

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

**1. Wstęp**

Podstawą do wykonania recenzji było zlecenie Szanownego Pana prof. dr hab. inż. Tadeusza Burczyńskiego, Dyrektora Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, zgodne z uchwałą Rady Naukowej IPPT PAN.

Recenzowana rozprawa doktorska powstała w Zakładzie Technologii Inteligentnych. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Łukasz Jankowski.

Głównym celem dysertacji jest opracowanie niskoczęstotliwościowej metody monitorowania stanu technicznego obiektów, która będzie wykorzystywała nieparametryczny model tegoż obiektu do identyfikacji jego modyfikacji w zakresie masy i sztywności oraz do identyfikacji niesprężystych obciążeń na niego działających. Metoda jest głównie dedykowana do ustrojów prętowych. Autor oparł algorytm identyfikacji na rozwijanej w jego ośrodku naukowym metodzie dystorsji wirtualnych. Aby osiągnąć cel główny rozprawy wykonał Doktorant badania w ramach celów szczegółowych takich jak: opracowanie efektywnych numerycznie technik obliczania odpowiedzi konstrukcji z modyfikacjami bądź poddanej obciążeniu, wybór i adaptacja odpowiednich technik optymalizacyjnych oraz opracowanie technik analizy wrażliwości również z uwzględnieniem ich własności numerycznych. Opracowana metodyka została zweryfikowana doświadczalnie na stanowisku laboratoryjnym.

**2. Zakres i treść rozprawy**

Praca zawarta jest na 139 stronach. Składa się z 7 rozdziałów. Dodatkowo Autor zamieścił w niej streszczenie w języku angielskim i polskim, wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów oraz spis bibliografii, który obejmuje 171 pozycji literaturowych.

Pierwszy rozdział poświęcił Autor na przedstawienie teorii i podstawowych definicji systemów monitorowania stanu konstrukcji. Zawarł w nim także krótki przegląd metod stosowanych w wyżej wymienionych układach do wykrywania uszkodzeń. Ostatnia część tego rozdziału stanowi określenie celu i zakresu pracy i przyjętej koncepcji badań naukowych, które pozwolą na osiągnięcie celu głównego i celów szczegółowych dysertacji.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawia metodę modelowania zmian masy i sztywności obiektów uwzględniając odpowiedź rezydualną układu zachowawczego o jednym i wielu stopniach swobody. Następnie definiuje pseudo obciążenia równoważne zmianom masy i sztywności. Na tej podstawie wyznacza doświadczalne macierze wpływu. W ostatnim podrozdziale tego rozdziału opisuje Autor modelowanie uderzenia niesprężystego.

Rozdział trzeci poświęcony jest identyfikacji zmian masy i sztywności monitorowanych obiektów. W rozdziale tym definiuje Autor funkcję celu, a następnie prezentuje różne metody wyliczania gradientu i hesjanu tejże funkcji. Przy każdej metodzie prowadzona jest analiza jej kosztu numerycznego. W ostatniej części rozdziału przeprowadza Doktorant dyskretyzację w dziedzinie czasu, podając dla czasu dyskretnego funkcję celu, jej gradient i hesjan.

Czwarty rozdział w całości poświęcony jest sformułowaniu zagadnienia prostego i odwrotnego w dziedzinie Laplace'a. Ponownie definiuje Doktorant równania ruchu, pseudo obciążenia i odpowiedź konstrukcji zmodyfikowanej, wyznacza także obszar wiarygodności rozwiązania. Następnie dla zagadnienia odwrotnego w dziedzinie Laplace'a podana jest funkcja celu, jej gradient i hesjan. Wyznaczone zostaje też optymalne wymuszenie testowe.

W piątym rozdziale opisuje Doktorant wykorzystane w pracy techniki numeryczne. A więc prezentuje metody rozwiązywania liniowych równań całkowych oraz ich dyskretyzację. Kolejno prezentuje algorytm rozkładu macierzy względem wartości szczególnych. Istotnym punktem rozdziału piątego jest analiza metod regularyzacji, niezbędnych przy rozwiązywaniu zagadnienia odwrotnego. Autor prezentuje metody bezpośrednie i iteracyjne oraz poświęca jeden podrozdział na przedstawienie metod znajdowania optymalnych wartości parametrów regularyzacji.

Bardzo wartościowy jest rozdział szósty, gdzie prezentuje Doktorant weryfikację opracowanej metody z zastosowaniem testów laboratoryjnych. Weryfikację prowadzi zarówno w dziedzinie czasu jak i w dziedzinie Laplace'a. Stosuje do badań laboratoryjny model przestrzennego wspornika kratowego. Rozdział zawiera opis stanowiska badawczego oraz zastosowane techniki wprowadzania modyfikacji masy i sztywności i przeprowadzania imitacji uderzeń niesprężystych. Następnie przedstawia Autor układ pomiarowy. Najważniejszą częścią tego rozdziału jest identyfikacja wprowadzonych zmian masy i sztywności oraz uderzenia a także dyskusja otrzymanych wyników.

Ostatni, siódmy rozdział pracy, zawiera podsumowanie pracy, wnioski końcowe oraz zestawienie oryginalnych osiągnięć pracy i formułuje kierunki dalszych badań.

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy

Głównym celem pracy jest opracowanie niskoczęstotliwościowej metody monitorowania stanu technicznego obiektów, wykorzystującej nieparametryczny model obiektu w stanie referencyjnym, przy jednoczesnej możliwości identyfikacji parametrycznie wyrażonych zmian tego obiektu.

Uzasadniając temat podjęty przez Doktoranta należy mieć na względzie gwałtowny rozwój technologiczny obserwowany na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat. Dzięki temu, a może przez to wytworzyły się warunki do budowy i ogólnej dostępności bardzo zaawansowanych urządzeń i maszyn. Wznoszone są coraz wyższe i większe budowle mogące pomieścić jednorazowo tysiące osób. Obserwowany jest gigantyczny wzrost ruchu zarówno drogowego, kolejowego jak i lotniczego. Jednocześnie należy zauważyć, że do obsługi tego ruchu stosowana jest infrastruktura projektowana i wytwarzana kilkanaście, a często i kilkadziesiąt lat temu, zupełnie nieprzystosowana do obciążeń jakim musi teraz stawić czoła. Powoduje to wzrost ryzyka wystąpienia uszkodzenia, które w konsekwencji może doprowadzić do zniszczenia danego obiektu, a w tragicznym przypadku, do śmierci osób dany obiekt eksploatujących. Stosowane dotychczas, tradycyjne metody oceny stanu technicznego obiektów polegające na okresowej inspekcji przestają być wystarczające. Dlatego w ostatnich kilkudziesięciu latach nastąpił znaczny wzrost zainteresowania środowisk naukowych metodami i układami monitorowania stanu technicznego. Zaobserwować można też potrzebę stosowania takich instalacji wyrażaną ze strony twórców i eksploatatorów odpowiedzialnych obiektów technicznych. Dlatego też chęć opracowania algorytmu, który będzie nadawał się do praktycznego zastosowania należy zakwalifikować jako podążanie za najnowszymi trendami światowymi. W tym kontekście cel postawiony przez Doktoranta oceniam jako aktualny i ważny z praktycznego punktu widzenia.

Przegląd literatury wykonany przez Autora jest szeroki – bibliografia obejmuje 171 pozycji i zawiera istotne prace z zakresu wiedzy związanego z tematyką pracy.

Metodyka pracy naukowej przyjęta przez Doktoranta wpisuje się w klasyczny schemat badań naukowych. Praca rozpoczyna się od przeglądu stanu wiedzy światowej w zakresie układów monitorowania, nieniszczącego wykrywania uszkodzeń i identyfikacji wymuszeń. Następnie formułuje algorytm i, co godne podkreślenia, sprawdza koszt numeryczny proponowanych rozwiązań. Potwierdza to aplikacyjny charakter pracy. Także przegląd i wybór technik numerycznych w tym algorytmu regularyzacji przekonują o dojrzałości naukowej Kandydata. W ostatnim kroku przechodzi Autor do eksperymentalnego sprawdzenia skuteczności zaproponowanych algorytmów. Z powodzeniem projektuje i wykonuje eksperyment weryfikacyjny, którego wyniki potwierdzają skuteczność przyjętych założeń.

Do oryginalnych osiągnięć pracy należy zaliczyć:

- Sformułowanie teoretycznych podstaw nieparametrycznej metody identyfikacji zmiany masy, sztywności i obciążenia w dziedzinie czasu i dziedzinie Laplace'a. Co

ważne model referencyjny obiektu zastosowany w metodzie bazuje wyłącznie na danych eksperymentalnych.

- Definicja pseudo obciążenia jako splotu nieznannej funkcji i zarejestrowanego wymuszenia impulsowego realizowanego młotkiem modalnym, co w istotny sposób upraszcza przygotowanie danych.
- Zastosowanie iteracyjnego algorytmu regularyzacyjnego CGLS, co pozwoliło na skrócenie czasu obliczeń potrzebnych do rozwiązania zagadnienia odwrotnego.
- Wyznaczenie analitycznych zależności na gradient i hesjan funkcji celu dzięki czemu możliwe było zastosowanie gradientowych metod optymalizacyjnych.

Jeżeli chodzi o stronę redakcyjną, dysertacja ma klasyczny układ typowy dla tego typu opracowań. Zawarty w pracy wykaz ważniejszych oznaczeń ułatwia jej analizę. Nieco brakuje zestawienia rysunków i tabel. Język pracy jest poprawny zarówno od strony stylistycznej jak i naukowej, choć można znaleźć pojedyncze przypadki dyskusyjne.

#### 4. Uwagi dyskusyjne

Autor niniejszej recenzji nie doszukał się w pracy żadnych większych błędów ani zaniedbań. Z obowiązku poniżej zamieszczone są pewne wątpliwości i kwestie dyskusyjne:

- W rozdziale pierwszym w definicji układów monitorowania stanu konstrukcji (SHM) brakuje informacji, że układy tego typu powinny także podawać prognozę pozostałego czasu pracy, a co za tym idzie, muszą posiadać moduł pomiaru lub identyfikacji obciążeń. Brak ten jest tym bardziej nieuzasadniony, że w literaturze, na którą powołuje się Autor (np. u Balageas'a i innych) moduł ten jest wymieniony. Co ciekawe metoda, którą Autor opracował również posiada zdolność identyfikacji zmian w obciążeniach.

- W rozdziale drugim twierdzi Autor, że uszkodzenie nie wpływa na macierz tłumienia. Założenie to nie jest prawdziwe. Istnieje szereg prac, w których na podstawie zmian tłumienia wykrywane są uszkodzenia (np. Kawiecki, Modena, Naldi).

- W pracy używa Autor terminu: problem wprost i problem odwrotny, wydaje mi się, że w polskiej terminologii raczej stosuje się określenie: zagadnienie proste i odwrotne.

- Rysunek 6-7 jest mało czytelny (przywodzi na myśl kończący się toner w drukarce). Myślę, że powiększenie jednego bloku i dodanie legendy znacznie ułatwiłoby jego interpretację.

- Drobne błędy literowe i edycyjne jak np. brak decyzji Autora czy hesjan pisać z małej czy z wielkiej litery zostaną przekazane bezpośrednio Autorowi do ewentualnego wykorzystania przy późniejszej publikacji efektów pracy.

Nasuwa się też kilka pytań:

- Dlaczego nie modelowano spadku masy jako potencjalnego uszkodzenia, a jedynie jej przyrost?

- Czym podyktowany był wybór częstotliwości próbkowania, w czasie prowadzonych badań laboratoryjnych. Dlaczego zastosowano tak wysoką częstotliwość (65,5 kHz) skoro pierwsze postacie drgań własnych obiektu badań występowały w paśmie do 200 Hz.
- Autor zastosował w pracy regularyzację metodą gradientów sprzężonych najmniejszych kwadratów (CGLS). Czy nie byłoby zasadne sprawdzić także działanie metody gradientów sprzężonych minimalnego błędu (CGME)?
- W metodach iteracyjnych regularyzacji kluczowy jest dobór odpowiedniej ilości kroków iteracji. Jaki algorytm zastosował Autor do określenia tej wielkości?

## 5. Wniosek końcowy

Problematyka badawcza ocenianej pracy doktorskiej mgra inż. Grzegorza Suwały poświęcona jest opracowaniu nieparametrycznej metody monitorowania zmian masy sztywności i obciążeń konstrukcji w oparciu o dane eksperymentalne. Rozwiązując określony problem badawczy Doktorant posłużył się klasyczną metodyką prowadzenia prac naukowych i osiągnął cel założony w rozdziale pierwszym dysertacji.

Temat rozprawy jest aktualny i istotny z praktycznego punktu widzenia. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a osiągnięte oryginalne wyniki stanowią istotny wkład w rozwój metod monitorowania stanu obiektów i identyfikacji obciążeń. Na podkreślenie zasługuje użyteczny charakter otrzymanych rezultatów. Przedstawione uwagi i pytania nie umniejszają wartości pracy.

Praca spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki z dn. 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami i dlatego proponuję przyjęcie jej przez Radę Naukową Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN i dopuszczenie do publicznej obrony.

