

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, 17.06.2014

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
Mgr inż. Małgorzaty Jarosińskiej  
pt. „Detekcja uszkodzeń stalowo-betonowych belek zespolonych  
metodami analizy modalnej”**

**1. Wstęp**

Podstawą do wykonania recenzji było zlecenie Szanownej Pani dr hab. inż. Marii Kaszyńskiej, prof. ZUT, zgodne z uchwałą Rady Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego.

Recenzowana rozprawa doktorska powstała w Zespole Konstrukcji Metalowych, Katedry Teorii Konstrukcji ZUT. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Stefan Berczyński, promotorem pomocniczym jest dr inż. Tomasz Wróblewski.

Głównym celem pracy jest krytyczna ocena możliwości zastosowania wybranych niskoczęstotliwościowych metod nieniszczącego wykrywania uszkodzeń do diagnostyki belek zespolonych stalowo-betonowych. Aby ten cel osiągnąć konieczne było rozwiązanie następujących zadań badawczych: opracowanie modelu matematycznego belki zespolonej stalowo-betonowej, przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych weryfikujących skuteczność wybranych metod oraz wskazanie najlepszej metody do detekcji i lokalizacji uszkodzeń w tychże belkach.

**2. Zakres i treść rozprawy**

Praca zawarta jest na 125 stronach. Składa się z 7 rozdziałów. Bibliografia obejmuje 125 pozycji literaturowych.

W rozdziale pierwszym Doktorantka przedstawiła krótko uzasadnienie podjęcia tematu oraz opisała wybrane metody diagnostyki uszkodzeń bazujące na analizie modalnej, w odniesieniu do ich stosowania w badaniach konstrukcji zespolonych. Istotnym elementem tego rozdziału jest cel i zakres pracy. Autorka sformułowała tutaj także tezę pracy.

Rozdział drugi podzielony jest na dwie zasadnicze części. W pierwszej przedstawiono podstawy analizy modalnej oraz omówiono cechy postaci drgań dla układów z tłumieniem proporcjonalnym oraz nieproporcjonalnym, co było niezbędne z uwagi na zastosowanie wskaźnika ETR (Energy Transfer Ratio) w dalszej części pracy. W kolejnych podrozdziałach rozdziału drugiego zawarto podstawy teoretyczne wyznaczania parametrów modalnych oraz współczynników, które w kolejnych rozdziałach pracy były poddane analizie – częstotliwość drgań własnych, współczynnik tłumienia modalnego, współczynniki zgodności postaci drgań MAC i PMAC, krzywizna postaci drgań oraz współczynnik ETR, który charakteryzuje układy o tłumieniu nieproporcjonalnym.

Rozdział trzeci to opis obiektów badań zarówno symulacyjnych jak i doświadczalnych. Były nimi dwie stalowo-betonowe belki zespolone różniące się sposobem zespolenia. Belki oznaczone przez Autorkę symbolami BG1 i BG2 różniły się sposobem zespolenia (BG1 – zespolenie w postaci stalowych sworzni, BG2 – zespolenie w postaci perforowanych listew stalowych). Kolejną część rozdziału trzeciego stanowi opis przyjętej metodyki badań. Każda z ocenianych metod była aplikowana zarówno do danych uzyskanych na drodze symulacyjnej jak i do wyników eksperymentów. Badania symulacyjne były prowadzone metodą sztywnych elementów skończonych (SES), a badania doświadczalne metodą modalnych testów impulsowych. W końcowej części rozdziału trzeciego przedstawiła Doktorantka wyniki otrzymane w trakcie eksperymentów modalnych przeprowadzonych dla nieuszkodzonych belek. Wyzaczyła pięć pierwszych giętych postaci drgań własnych belek oraz podstawową wzdłużną postać drgań własnych.

Rozdział czwarty pracy został w całości poświęcony budowie i dostrojeniu modeli matematycznych belek. W pierwszej części rozdziału przedstawiono podstawowe założenia przyjętej metody modelowania – Sztywnych Elementów Skończonych SES. Następnie opisano budowę modeli belek, które zostały zamodelowane w konwencji metody SES jako układy płaskie. Podczas modelowania oddzielnie potraktowano część stalową i betonową, co umożliwiło uwzględnienie w obliczeniach dwukierunkowej odkształcalności zespolenia. W dalszej części rozdziału przedstawiono sposób dostrojenia modelu do obiektów rzeczywistych. Identyfikowano własności elementów sprężysto tłumiących modeli belek. Do opisu tłumienia wykorzystano współczynniki strat określone niezależnie dla stali, betonu i zespolenia, których wartości zostały wyestymowane z wykorzystaniem wyników badań doświadczalnych. W końcowej części rozdziału sprawdziła Autorka jakość otrzymanych modeli przez porównanie wyników analizy modalnej teoretycznej i eksperymentalnej badanych belek.

W rozdziale piątym przedstawiono zaproponowane uszkodzenia belek i sposób ich realizacji podczas badań doświadczalnych, a następnie ich symulację numeryczną. Doktorantka analizowała dwa typy uszkodzeń. Każde z nich w różnych lokalizacjach i różnej wielkości. Dla belki BG1 wprowadzono uszkodzenia zespolenia, dla belki BG2 – uszkodzenie pasa dwuteownika stalowego. W rozdziale tym przedstawiono także zmiany częstotliwości drgań własnych oraz współczynnika tłumienia modalnego dla kolejnych stopni uszkodzeń belek.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych oraz eksperymentalnych dokonała Autorka w rozdziale szóstym analizy wrażliwości wybranych parametrów modalnych na uszkodzenia powstałe w zespole oraz w pasie dolnym dwuteownika stalowego. Zdecydowała się poddać ocenie metody bazujące na obserwacji zmian częstotliwości drgań własnych, współczynnika tłumienia modalnego, postaci drgań oraz współczynnika ETR. Efektywność użytych metod oceniała zarówno w zakresie detekcji jak i lokalizacji wprowadzonych uszkodzeń.

Ostatni rozdział pracy, siódmy, to wnioski końcowe pracy oraz plany dalszych badań.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

Głównym celem pracy jest ocena możliwości zastosowania wybranych niskoczęstotliwościowych metod detekcji i lokalizacji uszkodzeń do stalowo-betonowych belek zespolonych. Temat podjęty przez Doktorantkę jest bardzo aktualny i uzasadniony. Zarówno jeżeli chodzi o analizę niskoczęstotliwościowych metod nieniszczącego wykrywania uszkodzeń jak i o obiekt do których wyżej wymienione metody będą stosowane. Gwałtowny wzrost natężenia ruchu obserwowany w ostatnich kilku dekadach wymusza konieczność zmiany podejścia do oceny stanu technicznego obiektów infrastruktury drogowej o dużej odpowiedzialności takich jak mosty, czy wiadukty. Stosowana do tej pory powszechnie okresowa inspekcja wizualna nie daje już gwarancji uniknięcia katastrofy. Dlatego stopniowo zaczyna się wyposażać wspomniane obiekty w różnego rodzaju systemy monitoringu. Są to przeważnie układy bazujące na pomiarach odkształceń statycznych oraz drgań niskoczęstotliwościowych. W tym kontekście wybór metod dokonany przez Autorkę jest bardzo zasadny. Również analiza belek zespolonych stalowo-betonowych jako bardzo popularnego elementu konstrukcyjnego mostów czy wiaduktów podkreśla praktyczny aspekt podjętego tematu. Teoria układów monitorowania stanu obiektów wyróżnia cztery poziomy ich działania: wykrywanie, lokalizację, identyfikację i prognozę, jednakże praktyka mówi, co podkreśla wiele autorytetów z tej dziedziny jak np. C. Farrar, czy K. Worden, że aplikowane są najczęściej układy poziomu pierwszego. Zainteresowanie Doktorantki poziomem drugim dodatkowo potwierdza innowacyjny charakter pracy.

Przegląd literatury wykonany przez Autorkę jest szeroki – bibliografia obejmuje 125 pozycji, choć brakuje w nim kilku istotnych prac z zakresu wykrywania i lokalizacji uszkodzeń na podstawie parametrów modalnych. Warto tu wspomnieć o pracach zespołu Rucka – Wilde z Politechniki Gdańskiej – zastosowanie analizy falkowej do detekcji zaburzeń kształtu postaci drgań, czy pracach Zhanga i innych oraz Carrasco i innych dotyczących energii odkształcenia postaci drgań.

Na wysoką ocenę zasługuje opracowany w rozprawie model sztywnych elementów skończonych belek zespolonych. Model kształtownika stalowego będący elementem składowym modelu całej belki opracowano stosując zmodyfikowany (w stosunku do podejścia klasycznego) sposób rozdziału właściwości sprężysto-tłumiących na trzy niezależne elementy sprężysto-tłumiące umiejscowione odpowiednio w osi środkowej oraz pasów. Zastosowanie takiego podejścia ułatwiło późniejsze modelowanie uszkodzeń pasa kształtownika. Doktorantka w swych modelach belek uwzględniła tłumienie

nieproporcjonalne, które jest charakterystyczne dla konstrukcji zespolonych składających się z materiałów o różnych właściwościach tłumiących współpracujących za pośrednictwem warstwy stykowej generującej dodatkowe tłumienie. Przyjęcie założenia o tłumieniu nieproporcjonalnym umożliwiło zastosowanie współczynnika ETR do detekcji oraz lokalizacji uszkodzeń belek. Na uwagę zasługuje dokładność opracowanego modelu, zweryfikowana eksperymentalnie. Istotna jest także niewielka ilość sztywnych elementów skończonych, która pozwala na szybkie obliczenia, a to jest bardzo istotne przy próbie aplikacji wybranej metody. Warto także podkreślić fakt, że swym wyborem modelu, Doktorantka kontynuuje z powodzeniem prace prowadzone nad rozwojem metody sztywnych elementów skończonych w polskich ośrodkach naukowych.

Kolejnym osiągnięciem Autorki jest opracowanie algorytmu służącego do wyznaczania współczynnika ETR na podstawie badań doświadczalnych z wykorzystaniem modelu matematycznego.

Jeżeli chodzi o stronę redakcyjną, praca ma klasyczny układ typowy dla tego typu opracowań. Język pracy nie budzi zastrzeżeń, choć recenzentowi troszkę przeszkadzają kalki językowe. Czy nie lepiej brzmiałoby „energia przepływająca między postaciami” niż „energia transferowana”. Jakość materiałów ilustracyjnych zasługuje na wysoką ocenę. Wszelkie potrzebne dane są stabelaryzowane, a opisy eksperymentów kompletne i pozwalające na ich odtworzenie.

#### **4. Uwagi dyskusyjne**

Przegląd metod detekcji i lokalizacji uszkodzeń opartych na analizie modalnej zawarty w rozdziale pierwszym jest nieco ograniczony i brakuje w nim kilku istotnych metod, jak np.: analiza falkowa kształtu postaci drgań własnych, czy badanie energii odkształcenia postaci drgań własnych. Szczególnie, iż pierwsza z tych metod została opracowana w Polsce przez zespół M. Rucka, K. Wilde z Politechniki Gdańskiej. Takich braków można jeszcze wskazać więcej.

Na początku rozdziału drugiego Autorka przedstawia podstawy teoretyczne analizy modalnej. Prezentuje jej trzy warianty: teoretyczną TMA, eksperymentalną EMA i eksploatacyjną OMA. Wyraźnie brakuje w tym zestawieniu eksploatacyjnej analizy modalnej z dodatkowym zewnętrznym pobudzeniem OMAX.

Praca nie jest wolna od pomyłek i nieścisłości. Na przykład równanie macierzowe 2.4 nazywa Doktorantka układem równań, a dalej praktycznie to samo równanie (2.5) już jest zwane równaniem. I dalej na tej samej stronie macierz jednostkowa o wymiarach  $n \times n$  określona jest mianem wektora. W treści pracy często pisze Autorka, że prezentuje na rysunku przebieg widmowej funkcji przejścia, gdy tymczasem prezentuje przebieg jej amplitudy. Nawiasem mówiąc bardzo brakuje przebiegów fazy dla wspomnianych charakterystyk. Na stronie 58 pomyłono też okres próbkowania z częstotliwością próbkowania.

Na stronie 36 prezentuje Autorka metodę wyznaczania wskaźnika ETR na podstawie danych eksperymentalnych. Pisze tam o konieczności modyfikacji macierzy współczynników tłumienia C i sztywności K. Nie pokazuje jednak na czym ta modyfikacja miałaby polegać i jak się jej dokonuje. Brak ten jest dość istotny, gdyż bez tej wiedzy czytelnik nie będzie w stanie zastosować opisywanej metody.

Podczas modalnych badań eksperymentalnych warto byłoby przeprowadzić na wstępie testy liniowości i wzajemności, aby sprawdzić w jakim stopniu badany obiekt spełnia założenia analizy modalnej. Nie ma w pracy informacji o takich pomiarach.

Na stronie 44 pokazuje Autorka wykres słupkowy prezentujący tzw. AutoMAC, czyli porównanie wyestymowanych postaci drgań własnych do samych siebie. Analiza taka jest wykonywana, aby sprawdzić czy zastosowana sieć pomiarowa jest wystarczająco „gęsta”, czyli aby zapobiec wystąpieniu aliazingu przestrzennego. Dla dobrze dobranej sieci pomiarowej wartości MAC poza główną przekątną powinny być niskie, na przekątnej są zawsze 100%. Błędne jest więc wnioskowanie Doktorantki, że wybrane bieguny są poprawne bo wartości MAC na przekątnej sięgają 100%. Zaprezentowany wykres pokazuje, że dobrana sieć pomiarowa była odpowiednia, natomiast do oceny poprawności wyboru biegunów powinny zostać zastosowane wskaźniki typu MOV czy MPD.

Nasuwa się też kilka pytań:

- dlaczego nie badano uszkodzeń w części betonowej belki,
- dlaczego nie badano wpływu zmian temperatury na wyniki wykrywania uszkodzeń,
- czym podyktowany był podział postaci drgań własnych na obszary przy lokalizacji uszkodzeń,
- wskaźnik ETR jest bardzo czuły na wprowadzane uszkodzenia, czy badano zmiany ETR dla kilku pomiarów obiektu bez uszkodzenia?

## **5. Wniosek końcowy**

Problematyka badawcza ocenianej pracy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Jarosińskiej poświęcona jest ocenie możliwości zastosowania wybranych metod do detekcji i lokalizacji uszkodzeń w zespolonych belkach stalowo-betonowych. Doktorantka czyni to prowadząc zarówno badania symulacyjne na autorskim modelu sztywnych elementów skończonych, jak i badania doświadczalne na obiektach rzeczywistych.

Temat rozprawy jest aktualny i istotny z praktycznego punktu widzenia. Doktorantka wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a osiągnięte oryginalne wyniki stanowią wkład w rozwój metod diagnostyki i monitorowania stanu obiektów. Przedstawione uwagi dyskusyjne 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 Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego i dopuszczenie do publicznej obrony.

