

Prof. dr hab. inż. Janusz Kowal

Kraków, dnia 28 maja 2014 r.

Katedra Automatykacji Procesów

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Akademia Górniczo-Hutnicza

## R E C E N Z J A

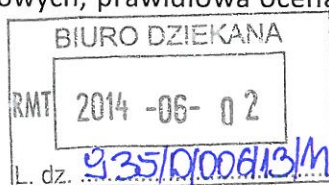
DZIEKAN  
Wydział Mechaniczny i Technologicznego  
prof. dr hab. inż. Arkadiusz Mężyk

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Abramowicz  
pt.: *Modelowanie drgań przestrzennych i identyfikacja parametrów  
dyskretnych modeli stalowo-betonowych belek zespolonych***

### 1. Wprowadzenie i ogólna ocena rozprawy

Przedmiotem analiz teoretycznych oraz badań doświadczalnych w przedstawionej przez mgr inż. Małgorzatę Abramowicz rozprawie doktorskiej są modelowanie oraz analiza drgań przestrzennych stalowo-betonowych belek zespolonych. Belki takie są przykładem powszechnie stosowanych w budownictwie konstrukcji zespolonych. W elementach tego typu wzajemne połączenie stalowej i betonowej lub żelbetowej części przekroju, umożliwia lepsze wykorzystanie cech mechanicznych składowych materiałów, tj. stali przy rozciąganiu i betonu przy ściskaniu. Pozwala to na zmniejszenie zużycia stali kosztem zastosowania betonu, jako materiału tańszego oraz na projektowanie sztywniejszych konstrukcji przy mniejszej wysokości konstrukcyjnej. Zalety belkowych konstrukcji zespolonych dostrzeżone zostały przede wszystkim przy wykonywaniu stropów w budynkach oraz podczas konstruowania przęseł obiektów mostowych, zarówno drogowych, kolejowych jak również kładek dla pieszych.

Większość prac badawczych, poświęconych analizie tego typu konstrukcji, koncentrowała się na określeniu cech wytrzymałościowych, przy obciążeniu quasi-statycznym oraz rozwiązaniu problemów technologicznych. Prace poświęcone analizie właściwości dynamicznych tego typu obiektów, nadal należą do rzadkości. Tymczasem zarówno w przypadku stropów budynków użyteczności publicznej, jak również obiektów mostowych, prawidłowa ocena cech dynamicznych konstrukcji, może mieć kluczowy wpływ,



zarówno na komfort użytkowników, jak również na bezpieczeństwo konstrukcji. Do oceny bezpieczeństwa, już po wykonaniu konstrukcji, wykorzystywane są systemy bieżącego monitoringu stanu technicznego obiektu. Systemy te często bazują na ocenie zmieniających się parametrów modalnych charakteryzujących obiekt.

Analizując zachowanie się belek zespolonych, należy pamiętać o uwzględnieniu odkształcalności warstwy stykowej stal-beton. W wielu uproszczonych analizach, odkształcalność ta jest pomijana lub uwzględniana jest wyłącznie na kierunku stycznym do płaszczyzny styku stal-beton. Tymczasem uwzględnienie odkształcalności na kierunku normalnym do płaszczyzny styku materiałów jest równie ważne, gdyż pozwala uwzględnić zjawisko oddzielania się dwóch wspomnianych materiałów podczas drgań.

Zagadnienie drgań elementów belkowych, czy to zespolonych, czy wykonanych z jednorodnego materiału, często sprowadza się do analizy drgań o charakterze giętym w pionowej płaszczyźnie symetrii belki. Do analizy takich form drgań wystarczają płaskie modele obliczeniowe. W rzeczywistych obiektach, np. mostach kolejowych, oprócz wymuszeń generujących drgania giętne pionowe, pojawiają się również wymuszenia poziome pochodzące, np. od wężykowania czy sił bezwładności w obiektach zakrzywionych w planie. Oddziaływania poziome mogą generować drgania giętne poziome, drgania skrętne lub inne ze składowymi drgań na kierunku poziomym prostopadłym do osi obiektu. Analiza takiego zachowania się konstrukcji wymaga dysponowania przestrzennymi modelami z odpowiednio zidentyfikowanymi parametrami, opisującymi sztywność oraz właściwości tłumiące konstrukcji.

Wszystkie powyższe spostrzeżenia, oraz fakt, że w literaturze znanych jest niewiele prac dotyczących rozwiązywania zagadnienia drgań przestrzennych stalowo-betonowych belek zespolonych pozwalają stwierdzić, że tematyka jaką wybrała Doktorantka jest aktualna i uzasadniona nie tylko względami poznawczymi, ale również praktycznymi.

## **2. Charakterystyka rozprawy i jej merytoryczna ocena**

Recenzowana rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów, bibliografii oraz dwóch załączników. W rozdziale pierwszym, po krótkim wstępie, przedstawiono przegląd obecnego stanu zagadnienia na podstawie syntetycznego przeglądu literatury. Ujęto w nim zarówno opracowania dotyczące tematyki drgań konstrukcji zespolonych, jak również te dotyczące modelowania konstrukcji z wykorzystaniem metody sztywnych elementów skończonych oraz prace dotyczące wykorzystania analizy modalnej do bieżącego monitoringu stanu konstrukcji. Opierając się na wnioskach z przedstawionego w rozprawie przeglądu literatury oraz wynikach własnych, wcześniej prowadzonych analiz, sformułowano tezy oraz cele pracy. Teza pierwsza zakłada, że metoda sztywnych elementów skończonych, przy odpowiednim

zamodelowaniu połączenia belki stalowej z płytą żelbetową, może być efektywnym narzędziem do modelowania oraz oceny właściwości dynamicznych belkowych stalowo-betonowych konstrukcji zespolonych. Druga z postawionych tez zakłada, że wykorzystanie gradientowych metod minimalizacji pozwala na efektywne wyznaczenie estymat identyfikowanych parametrów modeli obliczeniowych belek zespolonych. Według trzeciej tezy estymacja parametrów modeli, może być efektywnym narzędziem do określania wielkości uszkodzeń, jakie mogą pojawić się w belce. Cel pracy skoncentrowany był na opracowaniu wiarygodnych przestrzennych modeli obliczeniowych belek zespolonych z odkształcalną warstwą stykową stal-beton oraz opracowaniu metod estymacji wybranych parametrów opisujących sztywność oraz właściwości tłumiące belki. Cel i dalszy zakres pracy jest podporządkowany udowodnieniu postawionych tez rozprawy.

Rozdział drugi poświęcono przedstawieniu wyników przeprowadzonych, w ramach pracy, badań doświadczalnych. Badania przeprowadzono na kilku elementach badawczych: trzech stalowo-betonowych belkach zespolonych, jednej płycie żelbetowej 60x600x2200 mm oraz dwuteowniku stalowym IPE160 o długości 3200 mm. Belki zespolone o długości 3200 mm wykonano na bazie kształtownika walcowanego IPE160 zespolonego z płytą żelbetową o stałym przekroju 60x600 mm. Belki różniły się między sobą gęstością rozmieszczenia stalowych sworzni zespalających. Badania wszystkich elementów prowadzono dla schematu swobodnego, podwieszając badane elementy, za pomocą podatnych lin, do układu dwóch ram stalowych. Stosowano wymuszenie impulsowe. Określano zestaw podstawowych charakterystyk dynamicznych elementów. Analizowano drgania giętne, skrętne, wzdłużne oraz drgania kształtownika względem płyty.

W rozdziale trzecim zdefiniowano przestrzenny model obliczeniowy belki zespolonej, opracowany w konwencji metody sztywnych elementów skończonych. Model składał się z trzech głównych komponentów, tj. modelu płyty, dwuteownika oraz zespolenia. Modelując płytę żelbetową dokonywano dwukierunkowej dyskretyzacji, na sztywne elementy skończone SES posiadające sześć stopni swobody. W stosunku do klasycznego rozwiązania spotykanego w literaturze, modyfikowano położenie elementów sprężysto-tłumiących łączących SES. Modyfikacja wprowadzona została w celu poprawnego odzwierciedlenia zachowania się płyty przy skrętnych formach drgań. Dwuteownik modelowano stosując klasyczny podział na SES, natomiast model zespolenia wykonano w postaci nieważkich EST, skupiających właściwości sprężysto-tłumiące sworznia otaczającego betonu oraz warstwy stykowej stal-beton, przypisanej do sworznia. Wyniki analiz weryfikowano częściowo ze ścisłymi rozwiązaniami analitycznymi oraz częściowo z wynikami uzyskanymi klasyczną metodą odkształcalnych elementów skończonych.

W rozdziałach czwartym oraz piątym przedstawiono algorytmy identyfikacji parametrów, opracowanych wcześniej modeli obliczeniowych belek zespolonych. Opracowano dwa niezależne algorytmy. Pierwszy z nich pozwalał na identyfikację parametrów sztywnościowych modeli. Należały do nich: wielokierunkowa sztywność zespolenia oraz zastępczy, dynamiczny moduł sprężystości betonu. Identyfikację

proawdzono wykorzystując wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych, tj. częstotliwości oraz postaci drgań własnych. W zależności od określonych współczynników wag, większy nacisk kładziony był na dopasowanie częstotliwości drgań własnych lub postaci drgań. Algorytm II pozwalał na określenie, nie tylko parametrów opisujących sztywność konstrukcji, ale również charakteryzujących właściwości tłumiące. Właściwości te opisywane były za pomocą trzech niezależnych współczynników strat, określanych dla stali, betonu oraz zespolenia. Algorytm ten bazował na porównywaniu doświadczalnych i obliczeniowych przebiegów częstotliwościowych funkcji przejścia. Obydwa algorytmy bazowały na minimalizacji wartości określonych funkcji celu, przy wykorzystaniu gradientowych metod minimalizacyjnych zaimplementowanych w systemie MATLAB. Skuteczność algorytmów weryfikowano dla różnych punktów startowych. Dodatkowo przeprowadzono analizę stopnia wrażliwości wybranych charakterystyk dynamicznych na zmianę identyfikowanych parametrów.

Rozdział szósty przedstawia symulacyjne obliczenia, weryfikujące przydatność opracowanych metod estymacji parametrów modeli, do detekcji lokalnych uszkodzeń, pojawiających się w warstwie stykowej stal-beton. Symulacji uszkodzeń dokonywano obniżając sztywność wybranych EST, symulujących pracę zespolenia. Lokalizacji miejsca uszkodzenia dokonywano analizując przebiegi krzywizny postaci drgań oraz analizując wartości wektora sił resztkowych. Opracowana metoda trafnie wskazywała lokalizację uszkodzonego elementu zespolenia. Wcześniej opracowane algorytmy identyfikacji z powodzeniem wykorzystywano do określenia stopnia uszkodzenia.

Wnioski z przeprowadzonych analiz oraz kierunki dalszych prac zawarto w skondensowanej formie w rozdziale siódmym pracy.

Opiniowana rozprawa doktorska ma klasyczny układ. Swoim zakresem obejmuje zarówno zagadnienia teoretyczno-obliczeniowe, wiążące się z identyfikacją parametrów opracowanych modeli obliczeniowych, jak i badania doświadczalne, których wyniki zostały wykorzystane zarówno do rozpoznania przestrzennego charakteru pracy belek zespolonych, jak również do identyfikacji parametrów modeli.

Autorka rozprawy kontynuuje tematykę badań w zakresie dynamiki stalowo-betonowych belek zespolonych, podjętą przed kilku laty przez zespół badawczy z Katedry Teorii Konstrukcji oraz Instytutu Technologii Mechanicznej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Doktorantka umiejętnie skorzystała z dotychczasowych osiągnięć zespołu badawczego, w którym pracuje, wnosząc do rozważanej tematyki nowe koncepcje.

Do oryginalnych i wartościowych osiągnięć rozprawy należy zaliczyć:

1. Modyfikację techniki modelowania płyt o stałej grubości w konwencji metody sztywnych elementów skończonych, pozwalającą na poprawne odzwierciedlenie zachowania się modelu w zakresie identyfikacji skrętnych form drgań płyty.



2. Wykorzystanie opracowanej techniki modelowania płyty do wykonania przestrzennego modelu belki zespolonej z odkształcalną warstwą stykową stal-beton. Model pozwala na analizę wszystkich, określanych doświadczalnie form drgań belek, tj. giętnych, skrętnych, wzdłużnych oraz drgań kształtownika względem płyty.
3. Opracowanie algorytmu estymacji parametrów opisujących sztywność oraz właściwości tłumiące warstwy stykowej stal-beton. Niezależnie traktowano translacyjną sztywność na kierunku stycznym oraz normalnym do płaszczyzny styku materiałów oraz rotacyjną sztywność przy obrocie wokół osi belki. Algorytm bazował na wynikach niezależnie przeprowadzonych badań doświadczalnych. Do minimalizacji funkcji celu wykorzystywano gradientowe metody, znajdujące minimum nieliniowych funkcji wielu zmiennych z liniowymi i nieliniowymi ograniczeniami równościowymi i nierównościowymi.
4. Wykorzystanie opracowanych modeli ze zidentyfikowanymi parametrami do analizy wrażliwości charakterystyk częstotliwościowych belek na zmiany wybranych parametrów opisujących sztywność oraz tłumienie konstrukcji.
5. Przeprowadzenie symulacyjnych analiz z zakresu lokalizacji oraz określenia stopnia uszkodzeń warstwy stykowej stal-beton. Analizy prowadzono wykorzystując opracowane wcześniej algorytmy estymacji parametrów modelu.

Oceniając całość zaprezentowanej rozprawy pragnę podkreślić istotną wagę poznawczą i praktyczną, sformułowanego w tytule, głównego jej problemu. Zadanie zostało sformułowane właściwie a jego realizacja dokonana z pełnym powodzeniem. Potwierdziła się słuszność poprawności przyjętej metodyki postępowania zmierzającej do udowodnienia sformułowanych tez pracy. Stworzone modele matematyczne badanych struktur, identyfikacja parametrów, symulacje i badania eksperymentalne zostały opracowane starannie i poprawnie. Otrzymane wyniki badań zostały zaprezentowane w przejrzystej formie, ich wiarygodność nie budzi najmniejszych zastrzeżeń. Wnioski sformułowane przez Autorkę są dowodem Jej dużej wiedzy w zakresie umiejętnej interpretacji badań podstawowych, które mogą być wykorzystane w rozwiązywaniu problemów technicznych.

### **3. Uwagi krytyczne i kwestie dyskusyjne**

1. W rozdziale 3.2, opracowując model przestrzenny płyty żelbetowej, Doktorantka zmodyfikowała położenie elementów sprężysto-tłumiących, przesuwając je z narożników do środków sztywnych elementów skończonych. Zabieg ten zastosowano, ponieważ „... nie uzyskiwano zgodności w zakresie częstotliwości drgań skrętnych”. Powyższe zdanie jest jedynym uzasadnieniem tego zabiegu, nie przedstawiono żadnych wyników ani szerszych analiz dostrzeżonych niezgodności.

2. Analizując w rozdziale 3.3 model SES kształtownika stalowego, porównywano uzyskiwane wyniki z rozwiązaniem MES. Model MES opracowano na bazie jednowymiarowych elementów belkowych i tak, jak należało się spodziewać, obydwa modele dawały praktycznie te same rezultaty. Szkoda, że nie porównano wyników modelu SES z wierniejszym modelem MES, opracowanym na bazie elementów powłokowych oraz, że nie przedstawiono porównania modelu SES z wcześniej zaprezentowanymi wynikami badań doświadczalnych. Porównanie to pokazuje pewne rozbieżności w zakresie skrętnych form drgań kształtownika.
3. Parametry opisujące sztywność zespolenia  $K_h$  oraz  $K_v$  uwzględniały zarówno sztywność zastosowanych sworzni wraz z otaczającym je betonem jak również warstwy stykowej stal-beton. Szkoda, że nie podjęto próby niezależnego opisanie sztywności tych dwóch komponentów.
4. W tabeli 5.9 dokonano porównania wartości identyfikowanych sztywności  $K_h$  oraz  $K_v$  w zależności od przyjętych wartości współczynników wag  $w_f$  oraz  $w_\phi$ . Nie dokonano jednak krytycznej analizy identyfikowanych wartości parametrów  $K_h$  oraz  $K_v$  w zależności od analizowanej belki. Biorąc pod uwagę, że gęstość rozmieszczenia sworzni w analizowanych belkach rośnie, tego samego należałoby się spodziewać po wartościach identyfikowanych parametrów.
5. Str. 21, Tabela 2.1. W ostatnim wierszu, zgodnie z opisem, powinny być umieszczone przedziały ufności (95 procentowe). Podane zostały tylko pojedyncze liczby, które najprawdopodobniej określają długość przedziałów ufności. Jednak przy takiej interpretacji zapisów podane wartości są błędne. Dla rozkładu normalnego, prawdopodobieństwo ok. 0.95 uzyskuje się dla przedziału  $[m-2\sigma; m+2\sigma]$  a więc przedziału o długości ok  $4\sigma$ .
6. W równaniach (2.1) oraz (2.2) tym samym symbolem oznaczono wektor sił uogólnionych  $F(t)$  oraz odpowiadający mu wektor  $F(s)$  transformacji tych sił, podczas gdy są to zdecydowanie różne wielkości.
7. W drugiej linii pod wzorem (2.2) umieszczono opis: „ $s$  - zmienna zespolona,  $s=j\omega$ ”. Opis nie jest poprawny. W przekształceniu Laplace’a zmienna „ $s$ ” jest dowolną zmienną zespoloną a nie zmienną urojoną. Dzięki temu na płaszczyźnie Gaussa można wyznaczać obszary zbieżności całki występującej w definicji przekształcenia Laplace’a. Często oś liczb urojonych nie należy do obszaru zbieżności.
8. W trzeciej linii pod wzorem (2.2) umieszczono opis: „ $Q(s)$  – transformacja Laplace’a odpowiedzi układu”. Opis nie jest poprawny. Transformacja Laplace’a jest operacją matematyczną, która dla funkcji spełniającej odpowiednie warunki pozwala wyznaczyć jej transformację. Analogiczna uwaga dotyczy opisu w kolejnej linii.
9. Zdanie przed wzorem 2.6. Wzór 2.6 nie opisuje układu równań różniczkowych cząstkowych. Ostatnia część zdania poprzedzającego wzór 2.6 nie jest poprawna.
10. Str. 24, linia 11 od dołu. Wzór (2.5) nie opisuje równania charakterystycznego.
11. Str. 28, rys. 2.6. Przedstawiony wykres według autorki świadczy o poprawnym dopasowaniu wektorów własnych. Nasuwa się pytanie, jak można uzyskać 11 (jak wynika

z wykresu) poprawnych wektorów drgań własnych, mając pomiary tylko z 7 punktów leżących wzdłuż długości belki zespolonej (str. 21, druga linia od góry).

12. Str. 35, podpis pod rysunkiem 2.15 oraz zdanie umieszczone przed rysunkiem. Jak należy rozumieć, wprowadzone przez Autorkę, dziwne pojęcie „przebiegi amplitudowe częstotliwościowej funkcji przejścia”.
13. Wykres 2.15 (oraz szereg następujących po nim podobnych wykresów) nie oddaje podstawowej cechy charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej rozważanego obiektu przy przyjętym założeniu, że wejściem jest siła a wyjściem przyspieszenie. Cechą omawianej charakterystyki jest to, że dla częstości większych od częstości rezonansowej, charakterystyka zmierza do wartości stałej większej od zera. Wartości związane z poszczególnymi formami drgań, dodają się do siebie, przy przechodzeniu przez poszczególne rezonanse. Na wykresach umieszczonych w pracy, charakterystyki pomiędzy rezonansami zawierają wartości prawie równe zero. Być może wartości asymptotyczne są tak małe, że nie są widoczne przy przyjętej skali, ale w tym przypadku w pracy powinien zostać umieszczony komentarz omawiający ten problem.
14. Str. 37, tab. 2.13 oraz kolejne tabele zawierające podobne wyniki. W tabeli umieszczono wartości bezwymiarowych współczynników tłumienia, przyporządkowanych kolejnym formom drgań. W tekście pracy nie podano dokładnie algorytmu wyznaczania tych wielkości. Wspomniano tylko, że wykorzystano „szczytowe wartości amplitud”. Jeśli oznacza to, że autorka wykorzystywała wartości maksymalne występujące na charakterystykach amplitudowo-częstotliwościowych dla częstości rezonansowych, to należy nadmienić, że są to wielkości wyznaczone ze stosunkowo dużym błędem.
15. Str. 47, linia 2 od góry oraz wzór (3.1). Jeśli przyjęty układ współrzędnych jest tylko centralnym układem osi, to nie gwarantuje to zerowania się momentów dewiacji sztywnego elementu skończonego i wobec tego macierz mas nie będzie macierzą diagonalną tak jak to zapisano we wzorze (3.1).
16. Str. 90, wzór 5.1. Wzór jest błędny. W mianowniku, w nawiasie powinien być znak plus a nie minus.
17. W treści pracy, miejscami pojawiają się niefortunne zwroty lub określenia np.: str. 24 „częstościami własnymi tłumionymi”. Zdanie pod wzorem (2.10) zawiera fragment: „... sumę charakterystyk o jednym stopniu swobody”, str. 72 „... liczba ich wartości była taka sama, zarówno na prawo jak i na lewo od danego rezonansu...”, str. 92 „... odległość, jaka powstała pomiędzy przemieszczeniem postaci w danym punkcie...”

Przedstawione wyżej uwagi krytyczne i dyskusyjne nie umniejszają wartości pracy, którą oceniam pozytywnie. Traktuję je, jako wskazówki dla Autorki, bowiem nie dotyczą one głównego nurtu badań. Mają na celu poprawienie precyzyjności rozważań a nie wytknięcie Autorce usterek merytorycznych.

#### 4. Wniosek końcowy

W podsumowaniu przedstawionej recenzji wyrażam pogląd, że mgr inż. Małgorzata Abramowicz w przedłożonej rozprawie poprawnie sformułowała, rozwiązała i opisała oryginalne zadanie naukowe, jakim było opracowanie przestrzennych modeli obliczeniowych belek zespolonych oraz opracowanie metod estymacji wybranych parametrów sztywności i tłumienia. Uważam, że praca zawiera oryginalne rozwiązania, które poszerzają problematykę projektowania przestrzennych stalowo-betonowych belek zespolonych. Recenzowana rozprawa jest ważnym opracowaniem naukowym a jednocześnie ma bardzo duże znaczenie aplikacyjne i mieści się w dyscyplinie naukowej mechanika. Ponadto Autorka wykazała się właściwym opanowaniem zagadnień modelowania i analizy drgań konstrukcji oraz identyfikacji parametrów i lokalizacji uszkodzeń.

Wobec spełnienia wszystkich wymogów obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym, stawiam wniosek o przyjęcie pracy i dopuszczenie mgr inż. Małgorzaty Abramowicz do jej publicznej obrony.

