

## AUTOREFERAT

*Stronica pusta*

---

## Spis treści

<b>1. Imię i Nazwisko .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe .....</b>	<b>5</b>
a) Stopień doktora nauk technicznych .....	5
b) Tytuł magistra inżyniera .....	5
<b>3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....</b>	<b>6</b>
<b>4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789).....</b>	<b>7</b>
a) Tytuł osiągnięcia naukowego .....	7
b) Autor, tytuł, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy .....	7
c) omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania .....	8
<b>5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych .....</b>	<b>13</b>
a) Działalność przed uzyskaniem stopnia doktora .....	13
b) Działalność po uzyskaniu stopnia doktora .....	14
<b>6. Podsumowanie osiągnięć naukowo-badawczych.....</b>	<b>18</b>

*Stronica pusta*

## 1. Imię i Nazwisko

**Tomasz Wróblewski**

ResearcherID: E-8907-2014  
Scopus Author ID: 8516834500  
ORCID: 0000-0003-3731-1542

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

### a) Stopień doktora nauk technicznych

Okres studiów: 2001 – 2005 r., studia stacjonarne III-go stopnia prowadzone na Wydziale Mechanicznym Politechniki Szczecińskiej  
Jednostka nadająca stopień: Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Szczecińska  
Tytuł pracy doktorskiej: *Ocena właściwości dynamicznych belek zespolonych*  
Dziedzina/dyscyplina: nauki techniczne/budownictwo  
Data obrony: **29.06.2006 r.**  
Promotor: prof. dr hab. inż. Stefan Berczyński  
Recenzenci: prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak  
prof. dr hab. inż. Piotr Aliawdin

### b) Tytuł magistra inżyniera

Okres studiów: 1996 – 2001 r., studia jednolite magisterskie  
Jednostka nadająca tytuł: Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Szczecińska  
Tytuł pracy: *Analiza statyczno-wytrzymałościowa ustroju nośnego wieloprzęsłowego sprężonego wiaduktu zespolonego*  
Data obrony: 10.09.2001 r.

**3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

<b>od 2014</b>	<b>Adiunkt</b> Zakład Teorii Konstrukcji / Zespół Dydaktyczny Konstrukcji Metalowych (kierownik ZTK od 2016, kierownik ZDKM od 2017) Wydział Budownictwa i Architektury, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
<b>2009 – 2014</b>	<b>Adiunkt</b> Katedra Teorii Konstrukcji / Zespół Dydaktyczny Konstrukcji Metalowych Wydział Budownictwa i Architektury, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
<b>2006 – 2009</b>	<b>Adiunkt</b> Katedra Teorii Konstrukcji / Zespół Dydaktyczny Konstrukcji Metalowych Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Szczecińska
<b>2004 – 2006</b>	<b>Asystent</b> Katedra Teorii Konstrukcji / Zespół Dydaktyczny Konstrukcji Metalowych Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Szczecińska
<b>2001 – 2005</b>	<b>Student studiów stacjonarnych III-go stopnia</b> Katedra Teorii Konstrukcji / Zespół Dydaktyczny Konstrukcji Metalowych Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Szczecińska
<b>2000 – 2001</b>	<b>Asystent stażysta</b> Katedra Teorii Konstrukcji / Zespół Dydaktyczny Konstrukcji Metalowych Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Szczecińska

**4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)**

**a) Tytuł osiągnięcia naukowego**

***Zastosowanie metody sztywnych elementów skończonych do oceny charakterystyk dynamicznych płytowo-belkowych układów konstrukcyjnych***

**b) Autor, tytuł, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy**

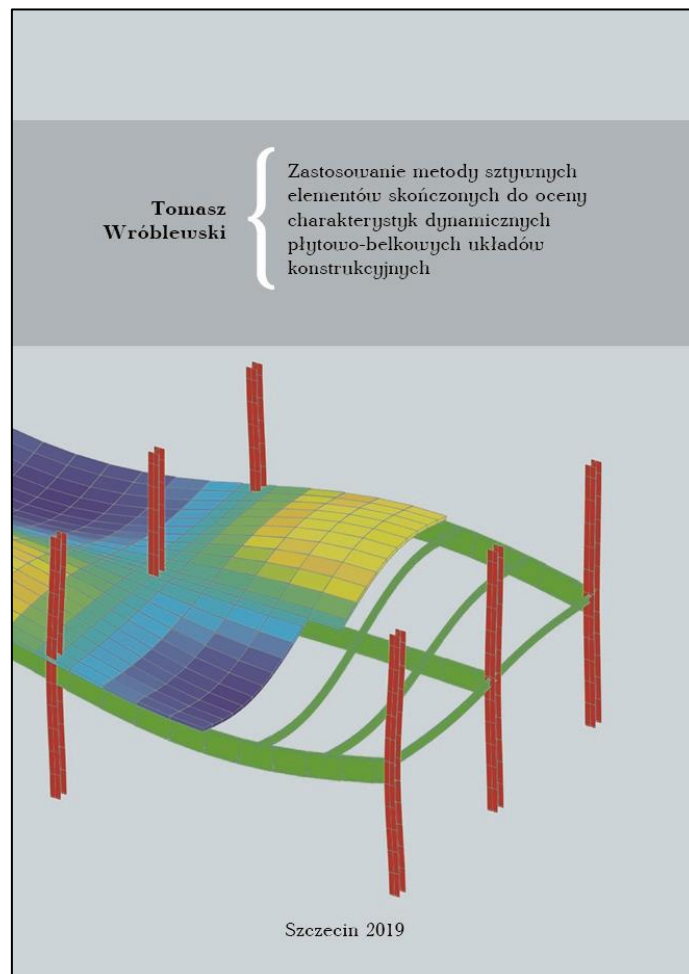
Monografia:

**Wróblewski T.:** *Zastosowanie metody sztywnych elementów skończonych do oceny charakterystyk dynamicznych płytowo-belkowych układów konstrukcyjnych.* Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, 2019, ISBN 978-83-7663-284-1.

Recenzenci wydawniczy:

Dr hab. inż. Piotr Pawełko, prof. ZUT

Dr hab. inż. Maciej Szumigała, prof. PP



**c) omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

Płytkowo-belkowe układy konstrukcyjne są powszechnie stosowane w przypadku, gdy kluczowym czynnikiem decydującym o ostatecznej formie ustroju jest jego ciężar. Takie rozwiązania konstrukcyjne znajdują zastosowanie w branży budowlanej, przemyśle okrętowym, lotniczym czy w sektorze kosmicznym. W budowlanych obiektach kubaturowych płyty usztywnione belkami pełnią zazwyczaj rolę stropów pomiędzy kondygnacjami budynków. W budownictwie mostowym wykorzystywane są jako płyty jezdne pomostu. Nowoczesne rozwiązania technologiczno-materiałowe umożliwiają konstruowanie coraz lżejszych obiektów. Do rozwiązań takich należą między innymi kolejne generacje stalowo-betonowych konstrukcji zespolonych, szczególnie jeśli do wykonania płyty wykorzystywane są betony lekkie. Konstrukcje o zredukowanej masie są bardziej narażone na wpływy oddziaływań o charakterze dynamicznym, w związku z czym o ostatecznym kształcie projektowanych obiektów decydują coraz częściej nie względy wytrzymałościowe, lecz warunki określone stanem granicznym użyteczności. Przekroczenie warunków tego stanu w odniesieniu do konstrukcji stropów w budynkach lub obiektów mostowych, w tym kładek dla pieszych, ujawnia się w postaci np. nadmiernych ugięć lub nadmiernej wrażliwości układu na drgania, które oprócz wyraźnego dyskomfortu użytkowników mogą również zakłócać pracę precyzyjnych maszyn umieszczanych na stropach np. w szpitalach czy laboratoriach.

Rozwiązanie zagadnienia drgań usztywnionych konstrukcji płytowych ma również duże znaczenie w kontekście diagnostyki oraz monitoringu stanu technicznego istniejących konstrukcji (ang. *structural health monitoring*, SHM). Idea systemów SHM zakłada obserwację zmian właściwości dynamicznych obiektu w czasie, co pozwala w porę wykryć oraz zlokalizować uszkodzenie. Usunięcie uszkodzenia w jego początkowej fazie może zapewnić bezpieczną eksploatację obiektu bez konieczności wyłączenia go z użytkowania.

Wiarygodny model obliczeniowy konstrukcji potrzebny jest na każdym etapie jej istnienia. Przedstawić to można na przykładzie zespolonej konstrukcji mostowej. Pierwszy etap to proces projektowania obiektu. Na tym etapie model obliczeniowy niezbędny jest do przeprowadzenia analiz pozwalających przewidzieć odpowiedź układu na działanie obciążeń komunikacyjnych o charakterze statycznym oraz dynamicznym. Drugi etap to budowa oraz przekazanie obiektu do eksploatacji. Model wymagany jest między innymi w przypadku skomplikowanego procesu montażu jak również w celu wykonania projektu próbnego obciążenia. Model opracowany na etapie projektowania może zostać uaktualniony poprzez wprowadzenie zmian, do których doszło w trakcie realizacji obiektu oraz uwzględnienie rzeczywistych właściwości materiałów użytych w trakcie budowy. Ostatnim etapem jest faza eksploatacji. Model obliczeniowy opracowany w fazie projektu ze zmianami wprowadzonymi



w trakcie budowy może być dalej skutecznie wykorzystywany do prowadzenia monitoringu stanu technicznego obiektu. Jest to niezmiernie ważny aspekt w przypadku nowatorskich, dużych, odpowiedzialnych konstrukcji. Model obliczeniowy, który ma zostać wykorzystany do budowy systemu monitoringu, musi dokładnie odwzorowywać rzeczywiste zachowanie się konstrukcji, szczególnie w zakresie oddziaływań dynamicznych. Wynika to z faktu, że systemy monitorujące stan techniczny często bazują na pomiarach właściwości dynamicznych takich jak częstotliwości drgań własnych, postaci drgań, parametry tłumienia itp. Do budowy modelu konstrukcji oraz oceny jej właściwości dynamicznych najczęściej wykorzystywane są metody numeryczne, między innymi najpopularniejsza z nich metoda elementów skończonych czy metoda elementów brzegowych.

Celem monografii wskazanej jako osiągnięcie naukowe (wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dz. U. 2017 r. poz. 1789) była ocena możliwości zastosowania alternatywnej metody, jaką jest metoda sztywnych elementów skończonych do analizy właściwości dynamicznych płytowo-belkowych ustrojów konstrukcyjnych z uwzględnieniem specyfiki konstrukcji używanych w budownictwie. Szczególna uwaga poświęcona została analizie właściwości stalowo-betonowych konstrukcji zespolonych.

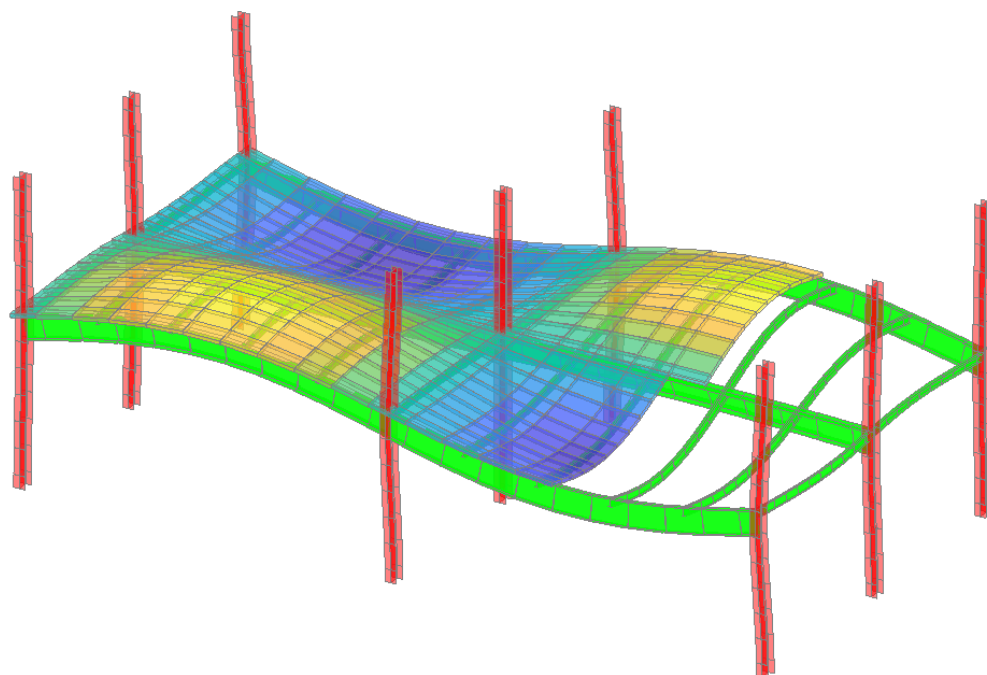
Metoda sztywnych elementów skończonych (SES) to oryginalna polska metoda stosowana do modelowania dynamiki złożonych układów konstrukcyjnych z więzami podatnymi. Początki metody SES, podobnie jak klasycznej metody elementów skończonych (MES), sięgają lat 60. ubiegłego wieku. Podstawy metody SES sformułował prof. Jan Kruszewski, który wraz z zespołem w 1975 roku opublikował pierwszą monografię podsumowującą prace prowadzone nad metodą w Instytucie Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Gdańskiej. Dotychczas metoda stosowana była z powodzeniem głównie podczas analizy konstrukcji mechanicznych takich jak maszyny, manipulatory robotów, pojazdy czy obrabiarki.

Zastosowanie metody SES do analizy konstrukcji płytowych o ciągłym rozkładzie masy z uwzględnieniem współpracy z belkami, wymagało przeprowadzenia szeregu analiz pozwalających na ocenę poprawności uzyskiwanych rozwiązań. Konieczne było również opracowanie autorskiego oprogramowania ze względu na brak komercyjnych systemów bazujących na metodzie.

W zakres prowadzonych w monografii analiz wchodziło opracowanie techniki modelowania podstawowych komponentów, tj. elementów belkowych oraz płyt o zmiennych warunkach brzegowych jak również opracowanie sposobu modelowania układów płytowo-belkowych z uwzględnieniem sztywnego lub podatnego zespolenia. Zakres prowadzonych analiz uwzględniał nie tylko analizę podstawowych formy drgań giętych, które mają największy udział w ocenie odpowiedzi układu na oddziaływania o charakterze dynamicznym,

ale również analizę innych formy drgań w tym drgań skrętnych, dystorsyjnych czy osiowych. Uwzględnienie dodatkowych form drgań, które zazwyczaj są pomijane podczas analiz, ma szczególne znaczenie w kontekście możliwości zastosowania opracowywanych modeli do diagnostyki stanu technicznego konstrukcji. Analizy prowadzono zarówno w zakresie drgań własnych nietłumionych jak również drgań wymuszonych z uwzględnieniem tłumienia nieproporcjonalnego.

Opracowane w konwencji metody SES modele obliczeniowe poddane zostały ocenie zgodności wyników, do czego wykorzystano referencyjne analityczne modele ciągłe opracowywane z uwzględnieniem teorii belek Timoshenki w przypadku belek i teorii Reissnera-Mindlina w przypadku płyt. Uwzględnienie teorii wyższego rzędu było ważne ze względu na szeroki zakres prowadzonych analiz. Wpływ odkształceń postaciowych powodowanych nieprężeniami stycznymi oraz sił bezwładności w ruchu obrotowym ma duże znaczenie w przypadku analizy postaci drgań o wyższych częstotliwościach. Model poprawnie odzwierciedlający zachowanie się konstrukcji w szerokim zakresie częstotliwości może być z powodzeniem stosowany w układach monitorujących stan techniczny konstrukcji. Dodatkowa weryfikacja prowadzona była z wykorzystaniem wyników własnych badań doświadczalnych oraz modeli obliczeniowych opracowanych w konwencji klasycznej metody odkształcalnych elementów skończonych.

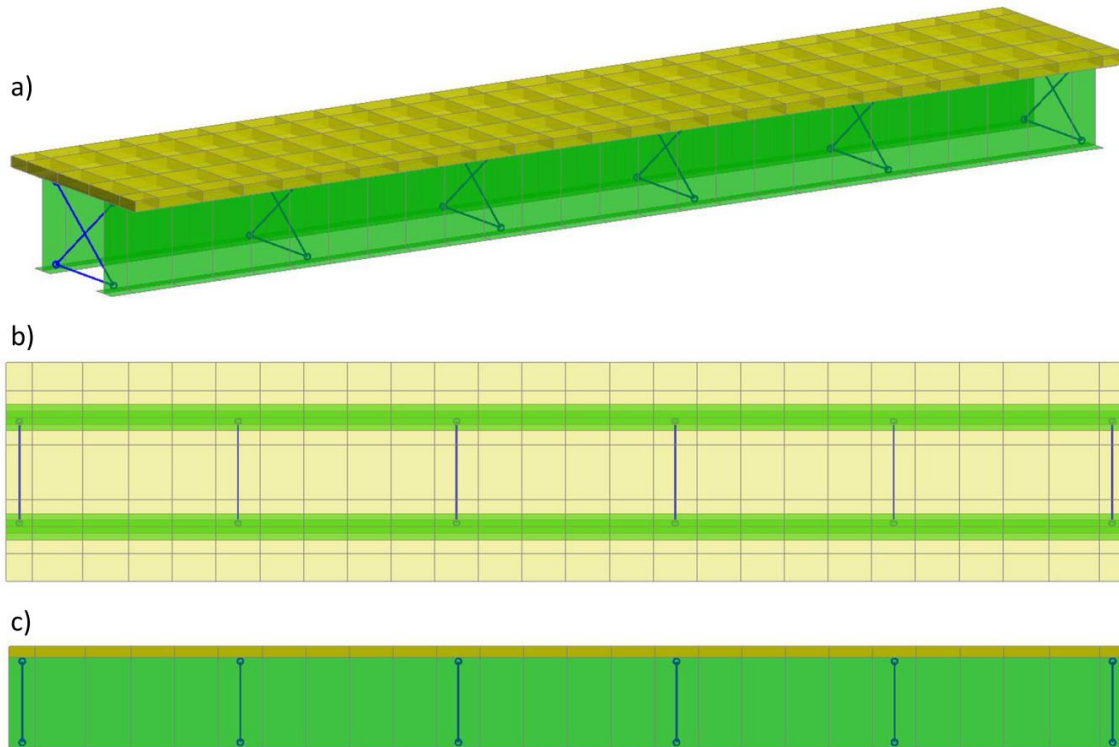


Ryc. 1. Strop zespolony – widok modelu opracowanego w konwencji metody SES

Końcowym etapem było zastosowanie metody SES do analizy przykładowych konstrukcji płytowo-belkowych spotykanych w budownictwie. Opracowany moduł oprogramowania pozwalający na modelowanie stropów zespolonych (ryc. 1) zapewniał możliwość uwzględnienia w trakcie analiz zmiennej sztywności zespolenia (połączenia płyty z belkami),

możliwość swobodnego kształtowania sztywności połączeń innych elementów (np. belek ze słupami) oraz swobodę w określaniu warunków brzegowych na krawędziach płyty oraz końcach elementów belkowych.

Kolejny moduł opracowanego oprogramowania pozwala na analizę właściwości dynamicznych zespolonych dwudźwigarowych przęseł mostowych znajdujących zastosowanie np. jako jednotorowe mosty lub wiadukty kolejowe.



Ryc. 2. Przęsło mostu zespolonego – widok modelu opracowanego w konwencji metody SES

Wiele elementów monografii nosi, według opinii autora, znamiona nowości w stosunku do dotychczasowych opracowań. Spośród nich można wymienić:

- opracowanie alternatywnego sposobu rozmieszczania elementów sprężysto-tłumiących EST łączących sztywne elementy skończone SES podczas modelowania dwuteowych elementów belkowych, polegającego na zastąpieniu pojedynczego elementu układem trzech niezależnych EST umieszczanych odpowiednio w osiach pasów oraz środka dwuteownika;
- modyfikacja techniki modelowania płyt prostokątnych dyskretyzowanych dwukierunkowo poprzez zastosowanie sztywnych elementów skończonych o sześciu stopniach swobody łączonych za pomocą elementów sprężysto-tłumiących charakteryzowanych blokiem sześciu współczynników sztywności (trzy współczynniki sztywności translacyjnej oraz trzy współczynniki sztywności rotacyjnej);

- opracowanie metody modelowania płyt o wysokim stosunku długości do szerokości z zastosowaniem dyskretyzacji jednokierunkowej z uwzględnieniem skorygowanej wartości współczynnika sztywności rotacyjnej;
- opracowanie techniki modelowania podatnej oraz sztywnej warstwy stykowej płyta-belka ze szczególnym uwzględnieniem łączników stosowanych w stalowo-betonowych konstrukcjach zespolonych;
- opracowanie autorskiego wielomodułowego oprogramowania pozwalającego na analizę prostych oraz złożonych układów płytowo-belkowych w zakresie analizy drgań własnych oraz wymuszonych;
- weryfikacja opracowanego oprogramowania z wykorzystaniem wyników rozwiązań ścisłych wg teorii Timoshenki w odniesieniu do elementów belkowych oraz teorii Reissnera-Mindlina w odniesieniu do płyt umiarkowanie grubych;
- weryfikacja oprogramowania z wykorzystaniem wyników analiz numerycznych własnych oraz innych badaczy przeprowadzonych z wykorzystaniem metody elementów skończonych MES;
- walidacja oprogramowania polegającą na porównaniu wyników analiz modeli SES z wynikami własnych badań doświadczalnych jednomateriałowych elementów prostych (płyta, belka) oraz wielomateriałowych elementów złożonych (stalowo-betonowa belka zespolona z zespoleniem podatnym).

Przedstawiona w monografii technika modelowania układów płytowo-belkowych w konwencji metody sztywnych elementów skończonych wraz z opracowanym oprogramowaniem mogą być z powodzeniem stosowane podczas analizy właściwości dynamicznych szeregu rzeczywistych konstrukcji inżynierskich, włączając w to zarówno obiekty budownictwa kubaturowego, jak i obiekty inżynierskie, np. konstrukcje mostowe. Jak wykazano w monografii, metoda SES zapewnia bardzo dobrą zgodność wyników w porównaniu z wynikami rozwiązań ścisłych, rozwiązań numerycznych bazujących na innych metodach, jak również z wynikami badań doświadczalnych. Modele opracowane w konwencji metody SES cechują się niewielkim stopniem złożoności, co przekłada się na krótki czas potrzebny na rozwiązanie zadania jednostkowego. Ma to szczególne znaczenie, jeśli prowadzone są analizy wymagające wielokrotnego przeliczania modelu, np. analizy parametryczne czy optymalizacyjne.

Opracowane oprogramowanie ma w opinii autora duży potencjał dalszego rozwoju. Kierunki dalszych prac będą uwzględniały w szczególności:

- opracowanie techniki modelowania jedno- i wielomateriałowych płyt ortotropowych;
- modyfikację oprogramowania pozwalającą na analizę konstrukcji stropów płytowo-belkowych o zredukowanej wysokości typu *slim floor*;

- analizę wpływu obecności strojonych tłumików drgań na właściwości dynamiczne konstrukcji płytowo-belkowych (implementacja oprogramowania w środowisku MATLAB pozwalała będzie na wykorzystania wbudowanych procedur optymalizacyjnych do ustalenia optymalnych właściwości oraz lokalizacji tłumików);
- rozwój oprogramowania w zakresie modelowania obiektów inżynierskich z uwzględnieniem specyfiki obciążeń komunikacyjnych, a w zakresie obiektów kolejowych z dodatkowym uwzględnieniem współpracy w układzie most-tor-pociąg.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

### a) Działalność przed uzyskaniem stopnia doktora

Od początku mojej pracy naukowej i badawczej zajmowałem się tematyką związaną z analizą właściwości dynamicznych i statycznych konstrukcji ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji zespolonych. Duży wpływ na wybór tej tematyki miał mój udział w przygotowaniu szeregu projektów oraz raportów z próbnymi obciążeniami zespolonych oraz żelbetowych obiektów mostowych, których okres budowy zbiegł się z rozpoczęciem mojej pracy naukowej [III.M.1–III.M.16]. Większość opracowań zrealizowana została w latach 2001–2003 r. Największym z analizowanych wówczas obiektów był zespolony most M-2 o całkowitej długości wynoszącej 534,1 m wchodzący w skład przeprawy mostowej przez rzekę Regalicę w Szczecinie. Brałem udział zarówno w opracowaniu projektu próbnymi obciążeniami [III.M.11] jak i podczas ich realizacji [III.M.13].

W latach 2005–2006 r. byłem wykonawcą projektu celowego [II.J.2] pt.: *Modułowy system monitorowania i diagnostyki mostów*, realizowanego przez Politechnikę Szczecińską, Akademię Górniczo-Hutniczą oraz Politechnikę Krakowską. Byłem odpowiedzialny za zaplanowanie oraz przeprowadzenie badań [II.F.1–II.F.4] weryfikujących poprawność działania systemu w warunkach laboratoryjnych oraz terenowych na moście o konstrukcji zespolonej. Jako obiekt analiz wybrałem most M-1 wchodzący w skład przeprawy mostowej przez rzekę Regalicę w Szczecinie. Badania terenowe prowadzone były w warunkach zimowych oraz letnich.

W okresie 2003–2005 r. brałem aktywny udział w corocznie odbywającej się *Szkole Analizy Modalnej* [II.L.1, II.L.2, II.L.4] organizowanej przez Katedrę Robotyki i Dynamiki Maszyn Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Monografie wydawane w wyniku dyskusji prowadzonych na szkole, miały na celu zebranie i przedstawienie obecnego stanu prac realizowanych w Polsce z zakresu analizy modalnej. Jestem współautorem kilku rozdziałów w monografiach [II.E.13–II.E.16].

W latach 2004–2006 r. byłem głównym wykonawcą projektu badawczego promotorskiego [II.J.1] pt.: *Ocena właściwości dynamicznych belek zespolonych*. Kierownikiem

projektu był prof. dr hab. inż. Stefan Berczyński. W trakcie prac nad projektem wykonałem oraz przebadalem trzy belki zespolone różniące się między sobą rodzajem zastosowanego zespolenia. Dla każdej belki opracowałem pięć niezależnych modeli obliczeniowych. Dwa z modeli były modelami dyskretnymi: przestrzenny model metody elementów skończonych z opracowany wykorzystaniem programu COSMOS/M oraz dwuwymiarowy model metody sztywnych elementów skończonych (SES) rozwiązany z użyciem autorskiego programu przygotowanego w środowisku MATLAB. Skuteczność metody SES w zakresie modelowania belek zespolonych została przeze mnie już wcześniej zweryfikowana, czego efektem była praca [II.E.2] z roku 2004 opublikowana w *Collection of Research Papers of the Baltic Association of Mechanical Engineering Experts No4*. Pozostałe trzy modele były modelami ciągłymi opracowanymi z uwzględnieniem teorii belek Eulera (dwa modele różniące się sposobem modelowania zespolenia) oraz teorii belek Timoshenki. Wszystkie trzy modele ciągłe zostały przedstawione w roku 2005 w mojej pierwszej publikacji [II.A.1] w czasopiśmie *Journal of Vibration and Control* znajdującym się w bazie JCR. W pracy tej nie zawarto jeszcze wyników badań doświadczalnych realizowanych w trakcie prac nad rozprawą.

#### **b) Działalność po uzyskaniu stopnia doktora**

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych kontynuowałem wraz z prof. Stefanem Berczyńskim prace związane z modelowaniem oraz analizą właściwości dynamicznych belek zespolonych. Poszerzone analizy wyników badań przeprowadzonych w trakcie prac nad rozprawą doktorską przyniosły skutek w postaci drugiej publikacji [II.A.2] w czasopiśmie JVC, w której dokonałem szczegółowego porównania wyników badań doświadczalnych z wynikami analiz numerycznych przeprowadzonych z zastosowaniem ciągłego modelu Timoshenki oraz dyskretnego, dwuwymiarowego modelu opracowanego w konwencji metody SES. Praca zawierała również wyniki przeprowadzonej identyfikacji parametrów modeli wykonanej z wykorzystaniem częstotliwości drgań własnych określonych doświadczalnie. W trakcie prac nad artykułem ustaliłem, że identyfikacja parametrów powinna być prowadzona z wykorzystaniem nie tylko częstotliwości ale również postaci drgań własnych.

W okresie 2006–2011 r. nadal brałem aktywny udział w odbywającej się w Krakowie Szkole Analizy Modalnej [II.L.5, II.L.8, II.L.12, II.L.13] organizowanej przez Katedrę Robotyki i Dynamiki Maszyn Akademii Górniczo-Hutniczej. Monografie wydawane w wyniku dyskusji prowadzonych na szkole, miały na celu zebranie i przedstawienie obecnego stanu prac realizowanych w Polsce z zakresu analizy modalnej. Jestem współautorem kilku rozdziałów w monografiach [II.E.17, II.E.18, II.E.20, II.E.22, II.E.23].

W latach 2007–2011 r. byłem głównym wykonawcą projektu badawczego [II.J.3] pt. *Dynamika stalowo-betonowych belek zespolonych*. Kierownikiem projektu był prof. Stefan Berczyński. Jako osoba odpowiedzialna za opracowanie i realizację harmonogramu badań

(doświadczalnych i numerycznych), zaprojektowałem, wykonałem oraz przebadałem sześć belek zespolonych (trzy z zespoleniem podatnym i trzy z zespoleniem sztywnym) oraz model kolejowego mostu zespolonego wykonany w skali 1:5. Badania prowadziłem zarówno pod obciążeniem statycznym jak i dynamicznym. Celem badań było określenie statycznych oraz dynamicznych charakterystyk badanych elementów w stanie bez oraz z wprowadzonymi lokalnymi uszkodzeniami. W przypadku belek uszkodzenia lokalizowałem w zespoleniu oraz w pasie dolnym belki stalowej. W modelu mostu analizowałem wpływ lokalnego uszkodzenia pasa dolnego, wybranych stężeń oraz wpływ osiadania podpór. Modele numeryczne badanych elementów opracowałem wraz z zespołem w konwencji klasycznej metody elementów skończonych (MES) wykorzystując system ABAQUS (w trakcie prac nad doktoratem wykorzystywałem program COSMOS/M). Drugą ze stosowanych metod była metoda sztywnych elementów skończonych. Zastosowanie metody SES wymagało opracowania zupełnie nowego oprogramowania. Program wykorzystywany w trakcie prac nad rozprawą doktorską nie był w pełni sparametryzowany i zastosowanie go do analizy innych elementów nie było możliwe. Rozpocząłem prace nad opracowaniem nowego, modułowego w pełni sparametryzowanego programu wykorzystując środowisko MATLAB. Program pozwalał modelować belki zespolone w przestrzeni trójwymiarowej, co umożliwiło analizę dodatkowych form drgań w tym drgań giętych poziomych, skrętnych czy dystorsyjnych. Należy zauważyć, że dostępne w literaturze wytyczne dotyczące modelowania płyt w konwencji metody SES zakładają, że sztywne elementy skończone posiadają trzy stopnie swobody. W opracowanym modelu dokonałem modyfikacji uwzględniając wszystkie sześć stopni swobody, co łączyło się z koniecznością wyznaczenia dodatkowych elementów macierzy bezwładności SES oraz dodatkowych współczynników sztywności charakteryzujących elementy sprężysto-tłumiące.

Prace nad analizą dynamicznych właściwości belek zespolonych kontynuowałem w okresie 2010–2013 r. trakcie realizacji kolejnego projektu badawczego [II.J.6] pt. *Identyfikacja modeli obliczeniowych stalowo-betonowych belek zespolonych*, którego byłem kierownikiem. Na potrzeby analiz wykonałem i przebadałem sześć kolejnych belek zespolonych oraz dodatkowo płytę żelbetową oraz stalową belkę dwuteową, które stanowiły komponenty belki zespolonej. W projekcie główny nacisk położyłem na opracowanie i przetestowanie procedur pozwalających na identyfikację parametrów modeli numerycznych belek zespolonych opracowanych w konwencji MES i SES. Identyfikowanymi parametrami były sztywność zespolenia, dynamiczny moduł sprężystości betonu oraz właściwości tłumiące stali, betonu i zespolenia opisywane niezależnymi wartościami współczynnika strat. Jako kryteria identyfikacji przyjmowałem uzyskanie jak najlepszej zgodności wyników badań doświadczalnych i analiz numerycznych porównując między innymi częstotliwości i postacie drgań własnych oraz przebiegi częstotliwościowych funkcji przejścia FRF. Automatyzacja

procesu identyfikacji parametrycznej wymagała wykorzystania procedur optymalizacyjnych. Wykorzystałem w tym celu funkcje pakietu MATLAB. Spośród dostępnych w systemie procedur wybrałem funkcję *fmincon*, znajdującą minimum nieliniowej funkcji wielu zmiennych z liniowymi i nieliniowymi ograniczeniami równościowymi i nierównościami. Funkcja umożliwia odnajdywanie minimum funkcji, bazując na jednym z czterech algorytmów. Podczas analiz testowano dwa z nich: algorytm Active-set oraz Interior-point. Ostatecznie do analiz wybrano algorytm Interior-point. Skorzystanie z algorytmu wiązało się z określeniem macierzy Hessego (Hesjan, macierz drugich pochodnych), do której wyznaczania wykorzystałem jedną z metod zmiennej metryki, metodę BFGS.

W trakcie prac nad obydwojoma ww. projektami badawczymi w zakresie modelowania oraz identyfikacji parametrów modeli MES współpracowałem z dr inż. Agnieszką Pełka-Sawenko, z kolei w zakresie identyfikacji parametrów modeli opracowanych w konwencji metody SES współpracowałem z dr inż. Małgorzatą Abramowicz. W ich przewodach doktorskich pełniłem rolę promotora pomocniczego. Efektem współpracy jest cykl współautorskich publikacji dotyczących: modelowania MES belek zespolonych i analizy drgań własnych [II.E.6], identyfikacji parametrów modeli MES [II.E.7], walidacji modeli MES z wykorzystaniem wyników badań doświadczalnych [II.E.9], detekcji uszkodzeń z wykorzystaniem modeli MES [II.E.10], identyfikacji parametrów modeli SES belek zespolonych [II.A.5] oraz identyfikacji parametrów modelu SES płyty żelbetowej [II.A.7].

Modele metody sztywnych elementów skończonych opracowane w trakcie prac nad obydwojoma ww. projektami badawczymi cechowały się tym, że model uwzględniał obecność tłumienia nieproporcjonalnego. W przypadku belek zespolonych nieproporcjonalność tłumienia wynika z różnych właściwości tłumiących stali, betonu oraz zespolenia. Do opisu tłumienia wykorzystałem współczynniki strat określone niezależnie dla stali, betonu i zespolenia, których wartości estymowałem z wykorzystaniem wyników badań doświadczalnych. W przypadku stali i betonu współczynniki strat określa tłumienie związane z tarciami wewnętrznymi w materiale. W przypadku zespolenia współczynnik strat charakteryzuje tłumienie samego elementu zespalającego, ale także tarcie występujące w jego otoczeniu jak również w płaszczyźnie styku stal-beton. W układach z tłumieniem nieproporcjonalnym następujący warunek  $\mathbf{CM}^{-1}\mathbf{K} = \mathbf{KM}^{-1}\mathbf{C}$  nie jest spełniony. W takim przypadku rozkład sztywności oraz rozkład tłumienia nie są sobie równe. Z tego powodu, kierunki osi głównych uogólnionej macierzy sztywności  $\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{M}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{KM}^{-\frac{1}{2}}$ , które określone są przez ortonormalne wektory własne tejże macierzy nie pokrywają się z analogicznie określonymi osiami głównymi uogólnionej macierzy tłumienia  $\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{M}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{CM}^{-\frac{1}{2}}$ . Powyższe powoduje występowanie zjawiska międzymodalnego transferu energii. Stosunek energii transferowanej podczas jednego cyklu do całkowitej energii układu przed cyklem



(w przypadku drgań ustalonych) oznaczany jest jako  $\zeta_i$  oraz nazwany współczynnikiem transferu energii ETR<sup>1</sup> (*ang.* Energy Transfer Ratio). Zależność pomiędzy częstością drgań tłumionych nieproporcjonalnie  $\omega_i$  a częstością drgań nietłumionych  $\omega_{ni}$  jest następująca  $\omega_i = \omega_{ni} \exp(\zeta_i)$ . Powyższy współczynnik ETR zdecydowałem się wykorzystać do detekcji oraz lokalizacji uszkodzeń w badanych belkach zespolonych. Wykorzystałem w tym celu wyniki badań doświadczalnych zgromadzone w trakcie prac nad projektem badawczym [II.J.3]. W trakcie prowadzonych prac ściśle współpracowałem z prof. Stefanem Berczyńskim oraz dr inż. Małgorzatą Jarosińską, w której przewodzie doktorskim pełniłem rolę promotora pomocniczego. Efektem prac jest cykl publikacji w *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* poświęconych detekcji [II.A.3] i lokalizacji [II.A.4] uszkodzeń oraz walidacji wynikami badań doświadczalnych [II.A.6]. W pracach jednoznacznie wykazano skuteczność zastosowania współczynnika ETR i jego potencjał w diagnostyce konstrukcji zespolonych cechujących się tłumieniem nieproporcjonalnym.

W latach 2008–2014 r. brałem udział w trzech edycjach konferencji *Konstrukcje Zespolone* odbywającej się w cyklu trzyletnim [II.L.6, II.L.10, II.L.15] organizowanej przez Instytut Budownictwa Uniwersytetu Zielonogórskiego oraz zielonogórskie oddziały PZITB i PTMTiS. Monografie wydawane w wyniku dyskusji prowadzonych na konferencji, miały na celu zebranie i przedstawienie obecnego stanu wiedzy z zakresu konstrukcji zespolonych. Jestem współautorem [II.E.19] i autorem [II.E.21] rozdziałów w monografiach.

Od roku 2016 biorę aktywny udział w projekcie, którego celem jest opracowanie pierwszego w Polsce systemu do wytwarzania przyrostowego z zastosowaniem mieszanek betonowych tzw. „drukarki 3D do betonu”. W skład grupy badawczej *3D Concrete Line* wchodzi pracownicy Wydziału Budownictwa i Architektury oraz Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Zaprojektowaliśmy [II.B.1] oraz wykonaliśmy prototypowy system drukujący, który został zaprezentowany na Międzynarodowych Targach Budownictwa i Architektury BUDMA 2019 w Poznaniu. Zaprojektowałem oraz wykonałem system komputerowy [II.B.2] wykorzystujący krzywe Lamé'go do kształtowania geometrii elementów wytwarzanych techniką przyrostową. Efektem dotychczasowych prac zespołu jest pięć zgłoszeń patentowych [II.C.2–II.C.6] z czego trzy zostały rozpatrzone pozytywnie [II.C.2–II.C.4] oraz dwie publikacje w czasopiśmie międzynarodowych [II.E.11, II.E.12].

---

<sup>1</sup> Liang Z., Lee G.C., 1991, *Damping of structures*, Part 1, National Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report NCEER-91-0004, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY

## 6. Podsumowanie osiągnięć naukowo-badawczych

Od początku mojej działalności naukowo-badawczej zajmuję się analizą stalowo-betonowych konstrukcji zespolonych ze szczególnym uwzględnieniem ich właściwości dynamicznych. Modelami wykorzystywanymi w trakcie analiz były zarówno matematyczne modele ciągłe, jak i modele dyskretne opracowane w konwencji klasycznej metody elementów skończonych oraz metody sztywnych elementów skończonych. Metodę SES stosuję z powodzeniem od ponad piętnastu lat do analizy zarówno prostych jak i złożonych konstrukcji zespolonych wykorzystując do tego autorski program opracowany w środowisku MATLAB. Prowadzone przeze mnie analizy koncentrowały się na modelowaniu, identyfikacji parametrów z wykorzystaniem wyników badań doświadczalnych oraz diagnostyce konstrukcji. Tabela poniżej zawiera zestawienie moich osiągnięć naukowo-badawczych.

Rodzaj osiągnięcia	przed doktoratem		po doktoracie		RAZEM	
	szt.	Liczba punktów MNiSW	szt.	Liczba punktów MNiSW	szt.	Liczba punktów MNiSW
Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie JCR <sup>1</sup>	1	15	6	117	7	132
Publikacje naukowe w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie JCR <sup>1</sup>	2	11	10	89	12	100
Monografie <sup>2</sup>	0	0	1	25	1	25
Rozdziały w monografiach <sup>2</sup>	4	20	8	50	12	70
Udzielone patenty <sup>2</sup>	0	0	3	90	3	90
Konferencje krajowe	6	-	15	-	21	-
Konferencje międzynarodowe	0	-	5	-	5	-
<b>SUMA</b>	13	<b>46</b>	48	<b>371</b>	61	<b>417</b>

<sup>1</sup> punktacja zgodnie z rokiem opublikowania

<sup>2</sup> punktacja zgodnie z Dz. U. 2017 Nr 0 poz. 804 z dnia 19 kwietnia 2017 r.

.....  
Tomasz Wróblewski