

**D Z I E K A N
I R A D A W Y D Z I A Ł U
B U D O W N I C T W A I A R C H I T E K T U R Y
Z A C H O D N I O P O M O R S K I E G O U N I W E R S Y T E T U T E C H N O L O G I C Z N E G O
W S Z C Z E C I N I E**

zapraszają na

PUBLICZNĄ OBRONĘ PRACY DOKTORSKIEJ

mgr inż. HANNY WEBER

która odbędzie się w dniu 25 czerwca 2014 r. (środa) o godz. 10⁰⁰
w sali 302 gmachu Wydziału Budownictwa i Architektury
przy al. Piastów 50 w Szczecinie

Temat pracy doktorskiej:

***„Numeryczna analiza wrażliwości statycznej i dynamicznej
złożonych układów konstrukcyjnych z parametrami losowymi”***

*„Numerical Analysis of Static and Dynamic Sensitivity of Complex Structural Systems
with Random Parameters”*

Promotor: ***dr hab. inż. Tran Duong Hien, prof. nadzw.***

*Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie*

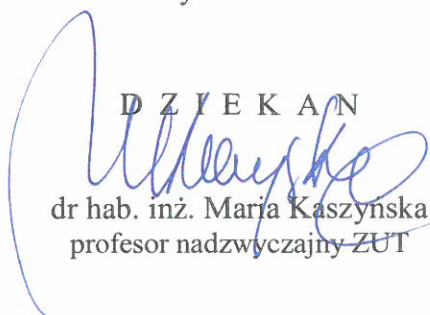
Recenzenci: ***prof. dr hab. inż. Włodzimierz Sosnowski***

*Uniwersytet Kazimierza Wielkiego
w Bydgoszczy*

dr hab. inż. Janusz Niczyj

Z pracą doktorską i opiniami Recenzentów zapoznać się można
w Czytelni Wydziału Budownictwa i Architektury
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie,
mieszczącej się w Budynku Jednostek Międzywydziałowych, przy al. Piastów 48, sala 524, piętro V.
Streszczenia rozprawy doktorskiej oraz recenzje dostępne są na stronie:
www.wbia.zut.edu.pl/wbia/awanse-naukowe/doktoraty

D Z I E K A N


dr hab. inż. Maria Kaszyńska
profesor nadzwyczajny ZUT

Summary

Numerical Analysis of Static and Dynamic Sensitivity of Complex Structural Systems with Random Parameters

In the paper the static and dynamic sensitivity problems of structural multi-degree-of-freedom systems are considered in terms of uncertainties in design parameters. Starting from the stochastic version of Lagrange equations, based on the mean-point second-order perturbation method, the hierarchical sets of equations of motion and equilibrium are formulated. The first two probabilistic moments of time-dependent and time-independent structural response as well as the first two probabilistic moments of static and dynamic sensitivity are derived with the mean values and cross-covariances of design parameters on input. It allows one to get not only the deterministic results of static and dynamic structural response and their sensitivities, but also the solution accuracy in the form of the mean values and their cross-covariances.

The formulations are illustrated by a number of numerical examples, cable-stayed bridges and bar domes, for instance. For the suspended bridge, a model with 3563 degrees of freedom, consisting of 154 truss elements, 510 beam elements and 635 shell elements, is adopted. For the 80-bar dome four various models are discussed to verify the influence of finite element setting on numerical results. A few model examples are analyzed and obtained results are compared with exact (analytical) solutions presented in the literature.

The beat effects in the structures with repeated geometry is observed and eliminated by using added masses and dampers. The way of processing and entering the cross-covariances matrix for design random variables is presented in a Fortran procedure.

The problem of systems with repeatable eigenvalues and the influence of parameter selection on the result accuracy are included. In the appendices some computer codes to generating input data of the complex structural model and to forming the cross-covariances matrix of random parameters are shown.

The paper is finished with concluding remarks on the effectiveness of the above-mentioned formulations and with some new aspects related to the future work.

Streszczenie

Numeryczna analiza wrażliwości statycznej i dynamicznej złożonych układów konstrukcyjnych z parametrami losowymi

W pracy rozważono problem statycznej i dynamicznej wrażliwości układów o wielu stopniach swobody, z uwzględnieniem niepewności w parametrach projektowych. Wychodząc ze stochastycznej wersji równań Lagrange'a i stosując metodę perturbacji w otoczeniu wartości średnich, sformułowano hierarchiczne układy równań ruchu i równowagi. Wyprowadzono wyrażenia na pierwsze i drugie momenty probabilistyczne czasowo-zależnej i czasowo-niezależnej reakcji układu oraz na pierwsze i drugie moment probabilistyczne statycznej i dynamicznej wrażliwości, wykorzystując wartości średnie i kowariancje wzajemne parametrów projektowych na wejściu. Pozwala to na uzyskanie nie tylko deterministycznej statycznej i dynamicznej reakcji układu i ich wrażliwości, jak również dokładności otrzymanych wyników w postaci wartości średnich i ich wzajemnych kowariancji.

Sformułowania zilustrowano za pomocą przykładów numerycznych, np. mostu podwieszonego i kopuły prętowej. Dla konstrukcji mostu przyjęto model o 3563 stopniach swobody, składający się z 154 kratowych, 510 belkowych i 635 powłokowych elementów skończonych. Dla kopuły tworzonej przez 80 prętów rozpatrzono cztery różne modele metody elementów skończonych, w celu zbadania wpływu doboru siatki na otrzymane wyniki. Przeanalizowano niektóre przykłady modelowe, których wyniki porównano z dokładnymi (analitycznymi) rezultatami z literatury.

Zaobserwowano efekty dudnienia układów geometrycznie się powtarzających i opisano ich eliminację przy wykorzystaniu dodatkowych mas i tłumików. Przedstawiono także sposób tworzenia i wprowadzenia macierzy kowariancji wzajemnych losowych zmiennych projektowych poprzez procedurę fortranowską.

Ujęto również zagadnienia analizy układu o powtarzających się wartościach własnych i wpływ doboru parametrów analizy dynamicznej na dokładność uzyskanych wyników. W załącznikach do rozprawy zawarto programy do generacji danych dla złożonych układów konstrukcyjnych oraz do tworzenia macierzy kowariancji zmiennych projektowych.

Niektóre uwagi wnioskujące o skuteczności przedstawionych sformułowań kończą rozprawę, wraz z pewnymi nowymi aspektami dotyczącymi dalszej pracy.

mgr inż. Hanna Weber
Wydział Budownictwa i Architektury
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Autoreferat

Rozprawa doktorska

Numeryczna analiza wrażliwości statycznej i dynamicznej złożonych układów konstrukcyjnych z parametrami losowymi

promotor pracy: dr hab inż. Tran Duong Hien, prof. ZUT

W pracy doktorskiej rozpatrzono problem statycznej i dynamicznej wrażliwości układów złożonych o wielu stopniach swobody z uwzględnieniem niepewności w parametrach projektowych. Rozprawa zawiera 150 stron i składa się z czterech głównych rozdziałów: wstępu, sformułowań i obliczeń dla układów deterministycznych, sformułowań i obliczeń dla układów stochastycznych oraz wniosków końcowych. Istotnym elementem pracy są załączniki zawierające listingi i wydruki programów oraz procedury fortranowskie.

Cel rozprawy

- Niestatystyczna analiza numeryczna statyki, dynamiki i wrażliwości złożonych układów konstrukcyjnych z parametrami deterministycznymi i losowymi
- Opracowanie nowego komputerowego podejścia umożliwiającego analizę wrażliwości złożonych układów konstrukcyjnych względem parametrów deterministycznych i losowych, które miałyby istotne znaczenie w praktycznym projektowaniu konstrukcji i spowodowałyby znaczące przyspieszenie tego procesu
- Dążenie do lepszego punktu projektowego dla rzeczywistego obiektu składającego się z wielu elementów — osiągnięcie złotego środka między wszystkimi rozważanymi kryteriami
- Obserwacja i eliminacja efektu dudnienia w układach o powtarzającej się geometrii

Zakres pracy

- Zastosowanie niestatycznego podejścia perturbacyjnego do analizy układów dużej skali z parametrami losowymi
- Uwzględnienie niepewności w geometrii, właściwościach materiałów i obciążeniach
- Wrażliwość — poszukiwanie gradientu odpowiedzi konstrukcji na zmianę parametrów projektowych. Przemieszczenia, naprężenia, czy wartości własne są traktowane jako reakcje układu, podczas gdy pola przekrojów poprzecznych elementów, grubości płyt, moduł Younga czy gęstość masy jako zmienne projektowe
- Wyznaczenie dwóch pierwszych momentów probabilistycznych statycznej i dynamicznej reakcji układu oraz ich wrażliwości wykorzystując wartości średnie i kowariancje wzajemne zmiennych projektowych jako dane wejściowe
- Przedstawienie tłumienia modalnego — dążenie do możliwie wiernego odwzorowania rzeczywistości i wszystkich sił działających na model
- Zilustrowanie wyprowadzeń teoretycznych za pomocą przykładów obliczeniowych konstrukcji o wielu stopniach swobody
- Numeryczne rozwiązanie problemu eliminacji dudnienia w symetrycznych układach za pomocą dodatkowych mas i tłumików

Treść pracy

We wstępie przedstawiono istotne znaczenie rozwoju technologii i informatyki we współczesnych czasach oraz ich wpływ na wszystkie dziedziny nauki. Następnie scharakteryzowano główne nurty analizy stochastycznej — podejście perturbacyjne, symulację Monte Carlo i rozwiniecie Neumanna. Analiza stochastyczna uwzględnia losowość w parametrach projektowych lub czynnikach zewnętrznych. W przypadku konstrukcji złożonych o wielu stopniach swobody nawet małe niepewności w wymienionych elementach mają ogromny wpływ na nośność systemu i nie można ich obliczyć analitycznie.

W obszarze budownictwa daje się zauważyć pewnego rodzaju wyścig, zarówno między projektantami jak i konstruktorami, o tworzenie obiektów przekraczających dotychczasowo istniejące bariery wysokości, czy rozpiętości, charakteryzujące się wiotkością i różnorodnością kształtów. Z uwagi na swoje cechy, konstrukcje te wymagają nie tylko wnikliwej analizy statycznej, ale również dynamicznej i wrażliwościowej. Ponieważ są to układy złożone o wielu stopniach swobody, obliczanie ich metodą analityczną staje się niemożliwe. Dlatego na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat nastąpił rozwój metody elementów skończonych (MES), na której bazuje większość współczesnych programów komputerowych.

Rozdział drugi zawiera rozpatrzenie statyki, dynamiki i wrażliwości w układach deterministycznych. W podrozdziałach 2.1 i 2.2 przedstawiono wzory na przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia w wybranym punkcie wewnątrz elementu. Stąd wyprowadzono wyrażenia na energię kinetyczną i potencjalną oraz pracę sił zewnętrznych. Wychodząc od równania Lagrange’a drugiego rodzaju, uzyskano różniczkowy układ równań ruchu, w którym równania równowagi traktowane są jako szczególny przypadek. Z uwagi na analizę konstrukcji o wielu stopniach swobody, do obliczeń przyjęto model tłumienia Rayleigh’a będący liniową kombinacją sztywności i mas.

Podrozdział 2.3 zawiera sformułowania macierzy sztywności dla typowych elementów skończonych. W podrozdziale 2.4, korzystając z uogólnionego problemu własnego, metodą superpozycji modalnej, otrzymano rozprężony układ równań. Następnie wyprowadzono wyrażenie na współczynnik tłumienia modalnego $\lambda_{(n)}$, odpowiadającego n -tej wartości własnej, obrazującego zależność $\lambda_{(n)}$ od wartości tłumienia wprowadzanej do programu na etapie obliczeń numerycznych.

W podrozdziale 2.5 przedstawiono sformułowania deterministycznych wrażliwości reakcji statycznej, dynamicznej i wartości własnych na zmianę parametrów projektowych. Dla przejrzystości prezentacji, wprowadzono notację sumacyjną, w której powtarzające się dwukrotnie wskaźniki implikują sumę. Poprzez wrażliwość rozumiano pochodne $d\phi/db_a$, opisujące zmianę funkcjonu odpowiedzi układu ϕ w zależności od zmiennych projektowych b_a . Zgodnie z założeniem macierze mas, tłumienia i sztywności oraz wektor obciążeń zewnętrznych są dwukrotnie różniczkowalne względem b_a . Wrażliwość wartości własnych została wyprowadzona dla układu o niepowtarzających się częstotliwościach. W przypadku czasowo-zależnego obciążenia wyróżniono dwa przypadki wrażliwości — punktową i przedziałową.

W podrozdziale 2.6 opisano przykłady zaczerpnięte z literatury i porównano wyniki analityczne z numerycznymi. Dla przypadku trójprętowej kratownicy obciążonej dwiema siłami, wyznaczono przemieszczenia węzłowe i wrażliwość statyczną przemieszczeń węzłów na zmianę pola

przekroju poszczególnych elementów. Otrzymano wartości bardzo zbliżone do analitycznych. Dodatkowo, przedstawiono wyniki wrażliwości wartości własnych na zmianę pola przekroju poszczególnych elementów. Drugim przykładem jest analiza wrażliwości wartości własnych belki wspornikowej o stałym przekroju poprzecznym, podzielonej na 100 elementów skończonych. Obliczenia numeryczne potwierdziły wyniki analityczne i ukazały, że w przypadku takiej konstrukcji największa wrażliwość wartości własnych występuje na zmianę pola przekroju elementów przy utwierdzeniu, najmniejsza zaś na wolnym końcu.

Podrozdział 2.7 przedstawia analizę statyczną, dynamiczną i wrażliwości dla mostu podwieszonego, stworzonego na podobieństwo rzeczywistego obiektu znajdującego się w Putrajaya w Malezji. Przyjęto następujące wymiary modelu: całkowita długość - 220m, rozpiętość głównego przęsła - 160m, wysokość pylonu - 104m. Głównie przęsło mostu zostało oparte przegubowo na obu końcach i dodatkowo podwieszone do pochylonego pylonu za pomocą 60 symetrycznie rozłożonych want. Pylon utrzymano w położeniu równowagi przez 42 tylne kable zamocowane do podłoża i dwa stalowe łuki. Między pylonem a łukami umieszczono 50 łączących prętów. Z uwagi na duże ugięcie środkowej części przęsła, do obliczeń przyjęto płytę z materiałów kompozytowych, wzmocnioną stalowymi podłużnymi i poprzecznymi żebrami. W obliczeniach numerycznych otrzymano model o 3536 stopniach swobody, składający się z 154 kratowych, 510 belkowych i 635 powłokowych elementów skończonych.

Z uwagi na to, iż głównym przeznaczeniem przykładu były obliczenia dynamiczne i wrażliwościowe, analiza statyczna obiektu została przeprowadzona w sposób uproszczony, w celu prawidłowego doboru przekrojów poprzecznych poszczególnych elementów. Obciążenia przyjęto na podstawie krajowych norm, tak jakby obiekt był zlokalizowany w Szczecinie. Przy obciążeniach wiatrem uwzględniono wyłącznie statyczne oddziaływanie tego czynnika. Zastosowanie nowoczesnych materiałów w płycie i wzmocnienie jej żebrami nie spowodowało efektywnego zminimalizowania ugięcia od obciążeń statycznych. Niezbędne okazało się eksperymentalne wprowadzenie sił skupionych w węzłach, mających na celu imitację wstępnego sprężenia lin. Przyczyniło się to nie tylko do redukcji ugięcia przęsła, ale również do korzystniejszego rozkładu sił w układzie.

Analiza dynamiczna mostu została przeprowadzona dla przypadku impulsu Heaviside'a, przyłożonego do szczytu pylonu na kierunku podłużnym do osi mostu. Problem własny rozwiązano dla pierwszych 12 dominujących par własnych. Obliczenia numeryczne wykonano metodą superpozycji modalnej dla 10000 kroków czasowych o wartości 0.004s każdy. Na wykresach przedstawiono czasowo-zależne wyniki przemieszczeń w reprezentatywnych punktach oraz sił wewnętrznych w wybranych elementach, uzyskane dla dwóch przypadków analiz — bez i z tłumieniem modalnym. Przebieg drgań środkowego punktu płyty wyraźnie wykazuje okresowe zmiany amplitudy w czasie, co wskazuje na obecność dudnienia w układzie. Zjawisko to może być spowodowane symetryczną budową modelu. Wyniki zagadnienia własnego wykazują bardzo zbliżone wartości sąsiednich częstotliwości własnych, co potwierdza wcześniejsze stwierdzenie. Wprowadzenie tłumienia do układu spowodowało stopniowe zanikanie drgań, ale nie wyeliminowało efektu dudnienia, ponieważ okresowe zmiany amplitudy są dalej widoczne.

Analiza wrażliwości wartości własnych w rozpatrywanym moście na zmianę pól przekrojów elementów kratowych i belkowych oraz na zmiany grubości elementów powłokowych w płycie dała cenne wyniki. Opisany układ okazał się najbardziej wrażliwy na zmianę pola przekroju

prętów łączących łuki z pylonem. Po uwzględnieniu obciążeń statycznych pozornie wydawało się, że elementy te mają drugorzędne znaczenie z powodu małego wyężenia. Dopiero wnikliwa analiza wrażliwości wartości własnych ukazała ich rolę w układzie.

Zazwyczaj wrażliwość dynamiczna ugięcia punktu jest największa na zmianę parametrów elementów znajdujących się w jego bezpośrednim otoczeniu. Tymczasem obliczenia czasowo-zależnych przemieszczeń, zarówno punktu środkowego płyty jak i szczytu pylonu, wykazały największą wrażliwość na zmianę pól przekrojów głównych kabli podwieszających przęsło. Potwierdziło to ich istotne znaczenie w układzie. Uzyskane wyniki i wnioski zmieniły spojrzenie na pracę konstrukcji jako całości i jej ewentualny mechanizm zniszczenia.

Rozdział 3 przedstawia sformułowania dla systemów konstrukcyjnych z parametrami losowymi. W podrozdziałach 3.1 i 3.2 wyprowadzono wyrażenia na pierwszy i drugi moment probabilistyczny czasowo-zależnej i czasowo-niezależnej reakcji układu, wykorzystując wartości średnie i kowariancje wzajemne parametrów projektowych na wejściu oraz przedstawiono sposób rozwiązywania układów równań hierarchicznych. W trakcie sformułowań jawne i niejawne funkcje zmiennych losowych rozwinięto w szereg Taylora w otoczeniu wartości średnich z dokładnością do drugiego rzędu.

Wychodząc ze stochastycznej wersji równań Lagrange’a drugiego rodzaju, zapisanych dla całkowitej energii układu, stosując metodę perturbacji w otoczeniu wartości średnich, w podrozdziałach 3.3 i 3.4 sformułowano hierarchiczne układy równań ruchu i równowagi. Głównymi zaletami niestatystycznego podejścia perturbacyjnego w odróżnieniu np. do symulacji Monte Carlo są: (i) zmienne losowe b_α nie muszą mieć rozkładu normalnego, (ii) jako dane wejściowe potrzebne są tylko pierwsze dwa momenty probabilistyczne zmiennych projektowych, (iii) uzyskujemy wyniki z taką samą dokładnością rozwiązując układ równań rzędu $o(\hat{r})$ nie $o(\hat{r}^3)$. Z drugiej strony otrzymywane na wyjściu pierwszy i drugi moment probabilistyczny oraz zmienne losowe b_α muszą charakteryzować się małą fluktuacją i ciągłością w otoczeniu wartości średniej, co może być traktowane jako mankament metody perturbacyjnej.

W podrozdziale 3.5 przedstawiono wyrażenie na wartości średnie i kowariancje wzajemne przemieszczeń i odkształceń, otrzymywane na wyjściu. Podrozdział 3.6 zawiera sformułowania pierwszego i drugiego momentu probabilistycznego czasowo-zależnej i czasowo niezależnej wrażliwości reakcji układu. Pozwala to na uzyskanie deterministycznej statycznej i dynamicznej reakcji układu i ich wrażliwości, ale również dokładności tych wyników w postaci wartości średnich i ich wzajemnych kowariancji, z uwzględnieniem członów do drugiego rzędu. Podejście to jest nowatorskim elementem pracy.

Powyższe sformułowania zilustrowano za pomocą obliczeń numerycznych przestrzennej kopuły tworzonej przez 80 prętów, o następujących wymiarach: średnica - 10m, wysokość - 5m. Dla tego obiektu powstały cztery różne modele MES — układ złożony z 80 elementów kratowych oraz trzy schematy belkowe o odpowiednio 80, 160 i 320 elementach skończonych. Pozwala to na określenie wpływu doboru siatki MES na otrzymywane wyniki numeryczne.

Obliczenia deterministyczne statyki i zagadnienia własnego rozwiązano niezależnie za pomocą dwóch programów POLSAP i ROBOT, uzyskując różnice na poziomie 3%. Ponieważ celem opisywanego przykładu była głównie analiza wrażliwości z parametrami losowymi, nie zaś

projektowanie rzeczywistego obiektu, zagadnienie statyki rozwiązano dla obciążenia jedną siłą skupioną przyłożoną na kierunku pionowym do szczytu kopuły.

Obliczenia stochastyczne wykonano za pomocą programu POLSAP, wraz z przygotowanymi przez autorkę preprocesorami. Szczegółowo opisano formowanie macierzy kowariancji parametrów projektowych. Prezentacja została wzbogacona o fragmenty procedur fortranowskich. Wstępne obliczenia stochastycznej statyki wykonano dla trzech różnych wartości współczynnika wariacji $\alpha = 0.05; 0.1$ i 0.15 . Opisano wpływ przyjętej wartości α na dokładność otrzymywanych przemieszczeń.

Dzięki analizie stochastycznej zaprezentowano wartości deterministyczne statycznych i dynamicznych przemieszczeń punktów oraz ich wartości średnie i odchylenia standardowe. W przypadku projektowania, powyższe rezultaty są bardzo istotne, ponieważ nawet małe niepewności w zmiennych projektowych mogą powodować znaczące różnice w otrzymywanych wynikach przemieszczeń i sił wewnętrznych. Badania wrażliwości przemieszczeń statycznych i dynamicznych na zmianę pól przekrojów poszczególnych elementów, pozwoliły na znalezienie newralgicznych punktów w układzie.

Przyjęcie symetrycznego schematu, zarówno pod względem podparcia jak i rozkładu prętów pozwoliło na zaobserwowanie efektów dudnienia w układach geometrycznie się powtarzających i opisano ich eliminację przy wykorzystaniu dodatkowych mas i tłumików. Analiza dynamiczna układu dała pozornie błędne wnioski, że same dodatkowe masy wystarczą do eliminacji efektu dudnienia. Dopiero obliczenia wrażliwości dynamicznej reakcji wykazały, że aby skutecznie wyeliminować to zjawisko niezbędne jest jednoczesne uwzględnienie mas skupionych i tłumików. Obliczenia różnych typów konstrukcji pozwoliły na wysnucie wniosku, że rozmieszczenie dodanych mas jest indywidualną sprawą dla każdego schematu. Jednakże w większości przypadków efekt dudnienia był skutecznie eliminowany po założeniu masy w punkcie przyłożenia obciążenia dynamicznego.

Porównanie wyników wrażliwości dla schematów belkowych zbudowanych z 80, 160 i 320 elementów skończonych wykazały, że we wszystkich trzech przypadkach potrzebna jest ta sama wartość masy dodanej dla usunięcia zjawiska dudnienia i nie zależy ona od przyjętego podziału MES. Powyższe wnioski uzyskano na podstawie obliczeń numerycznych, zakłada się, że znalezienie praktycznego rozwiązania będzie przedmiotem dalszej pracy naukowej.

Zagęszczenie siatki w schematach o 160 i 320 elementach belkowych dało korzystne wyniki sił wewnętrznych i przemieszczeń po długości poszczególnych prętów. Pozwala to na lepsze zrozumienie pracy konstrukcji. Jednak z uwagi na osobliwość zagadnienia spowodowaną wystąpieniem częstotliwości o bardzo zbliżonych wartościach, zbadanie wrażliwości dynamicznej układu na zmianę parametrów projektowych okazało się niemożliwe.

W pracy opisano również wpływ doboru parametrów analizy dynamicznej na dokładność uzyskanych wyników. Zbyt duża wartość kroku czasowego spowodowała błędne wykresy drgań układu — amplitudy malały do zera bez obecności tłumienia w układzie, co jest niemożliwe. Dopiero znaczące zmniejszenie wartości kroku czasowego dały poprawne wyniki. W załącznikach do rozprawy zawarto programy do generacji danych dla złożonych układów konstrukcyjnych oraz do tworzenia macierzy kowariancji zmiennych projektowych.

Z uwagi na to, że MES jest metodą przybliżoną, istotną częścią analizy powinno być sprawdzenie poprawności przyjętego modelu z punktu widzenia numeryki. Dla prostych układów o kilku stopniach swobody można to łatwo określić posługując się tzw. liczbą uwarunkowania, będącą stosunkiem maksymalnej do minimalnej wartości własnej. Jednakże dla złożonych układów jest to zadanie bardzo skomplikowane i wymaga opracowania efektywnej metody sprawdzenia poprawności danych wejściowych. Dlatego pominięto ten etap w pracy z założeniem rozwiązania opisanego problemu w przyszłych badaniach naukowych.

Wnioski

— Wrażliwość statyczna i dynamiczna z uwzględnieniem niepewności w parametrach projektowych jest efektywnym narzędziem w projektowaniu nowoczesnych obiektów. Daje pełny pogląd na rolę poszczególnych elementów w pracy konstrukcji jako całości

— Połączenie w analizie stochastyki i wrażliwości, pozwala na znalezienie tzw. punktu projektowego, czyli optymalnego rozwiązania przy jednoczesnym uwzględnieniu różnych czynników oraz na znalezienie newralgicznego elementu w danym układzie

— Uzyskiwany na wyjściu pierwszy i drugi moment probabilistyczny czasowo-zależnej i czasowo-niezależnej reakcji układu i ich wrażliwości z dokładnością do drugiego rzędu, jest niezwykle istotny z punktu widzenia optymalnego projektowania układu, i znacznie przyspiesza ten proces

— Efekt dudnienia w układach konstrukcyjnych można skutecznie wyeliminować za pomocą jednoczesnego uwzględnienia dodatkowych mas i tłumików

— Lokalizacja dodatkowych mas w układzie jest indywidualna dla konkretnego schematu konstrukcji i zależna od punktu przyłożenia wymuszenia

Dalsze prace

— Znalezienie praktycznego sposobu eliminacji efektu dudnienia w rzeczywistych układach przy pomocy dodatkowych mas i tłumików

— Opracowanie metody sprawdzenia modelu numerycznego, efektywnej dla układów złożonych o wielu stopniach swobody.

Warszawa, 26.04. 2014

Włodzimierz Sosnowski

Prof. dr hab. inż.

Instytut Mechaniki i Informatyki Stosowanej

Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

e-mail: wlodzimierzsosnowski@gmail.com

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Hanny Weber „Numerical Analysis of Static and Dynamic Sensitivity of Complex Structural Systems with Random Parameters”**

(„Numeryczna analiza wrażliwości statycznej i dynamicznej złożonych układów konstrukcyjnych z parametrami losowymi”)

1. Ogólne dane o rozprawie

Przedłożona mi do recenzji rozprawa Pani mgr inż. Hanny Weber napisana jest w języku angielskim. Zawiera łącznie 150 stron i składa się z czterech rozdziałów: wstępu, dwu dużych rozdziałów podstawowych i podsumowania. Promotorem rozprawy jest dr hab. Tran Duong Hien, profesor Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Właściwy tekst rozprawy jest poprzedzony spisem treści i spisem oznaczeń. Na końcu Autorka umieściła 4 dodatki zawierające pewne dodatkowe informacje o opracowanym programie komputerowym.

Tytuł rozprawy oddaje w dużym stopniu jej zawartość merytoryczną. Rozmiary i charakter jednego z przykładów numerycznych – mostu podwieszanego – wskazują na jej aspekty praktyczne i możliwość wykorzystania w budownictwie. Z drugiej strony duży nacisk położony na stronę matematyczną uzasadniałby zakwalifikowanie pracy do dziedziny nauk obliczeniowych a więc w pewnym stopniu – również do informatyki.

2. Ocena celu i zawartości pracy

Celem rozprawy doktorskiej p. mgr. inż. Hanny Weber było opracowanie metodologii analizy wrażliwości statycznej i dynamicznej złożonych układów konstrukcyjnych. Chodziło o znalezienie odpowiedzi na ważne pytanie, które musi postawić przed sobą każdy konstruktor, jak zmieni się na przykład analizowana częstość drgań gdy zmienimy wybrany wymiar geometryczny zwany parametrem projektowym. Zwykle chodzi w tym przypadku o tzw. Odstrojenie konstrukcji czyli oddalenia częstości drgań własnych i/lub wymuszonych od niebezpiecznej częstotliwości rezonansowej. Dodatkowo Autorka podjęła problem niepewności parametrów projektowych wynikającej np. z niedokładności wykonania elementów konstrukcji, niedokładności montażu itp. Ambitnym celem było również opracowanie oprogramowania przeznaczonego do weryfikacji poprawności przyjętej metodologii.

W rozdziale pierwszym czyli we wstępie Autorka uzasadnia wagę podjętych badań, pisząc o znaczeniu symulacji numerycznej i analizy wrażliwości. Omawia literaturę przedmiotu uwzględniając w szczególności najnowsze pozycje związane z dziedziną swojej pracy. Zwraca uwagę na zagadnienie identyfikacji parametrów projektowych mających największy wpływ na wybrane funkcje celu. Podkreśla szczególną wagę bezpieczeństwa konstrukcji i analizuje nowe możliwości które pojawiły się w momencie wprowadzenia zaawansowanych technik obliczeniowych do procesów projektowania.

Autorka połączyła przegląd literatury z krytyczną oceną stosowanych metod projektowania złożonych konstrukcji i zwróciła uwagę na fakt, że dopiero wykorzystanie zaproponowanych metod analizy w praktyce pozwoli uniknąć zagrożeń spowodowanych rezonansem (pękanie zmęczeniowe, utrata stateczności itp.).

W podsumowaniu, w rozdziale 4, Autorka przyznaje jednocześnie, że przeniesienie wniosków płynących z analizy na praktyczne rozwiązania jest tematem na osobne, bardzo złożone badania. Chodzi o optymalizację procesu praktycznej redystrybucji mas i doprecyzowanie

metod efektywnej poprawy parametrów tłumienia celem uzyskania korzystnych zmian częstotliwości.

Wybór takiego, nowatorskiego tematu prezentowanej rozprawy doktorskiej zasługuje zatem na pełne uznanie.

Szczegółowe omówienie wykorzystywanych metod analizy wrażliwości zawierają odpowiednio rozdziały drugi i trzeci. Obszerne przedstawienie znanych skądinąd metod badawczych rozwijanych między innymi od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku przez jej Promotora i stosowanych w modelowaniu numerycznym jest głęboko uzasadnione. Wynika z bardzo zaawansowanego, złożonego oraz niełatwego do zrozumienia charakteru tych metod z obszaru aż trzech dziedzin nauki: mechaniki, matematyki i informatyki. Autorka dokonała twórczej syntezy najnowszych osiągnięć z tych dziedzin opracowując własne procedury numeryczne potrzebne do zastosowania ich w przypadku złożonych konstrukcji budowlanych.

Rozdziały drugi, o statycznej i dynamicznej wrażliwości układów deterministycznych oraz trzeci, o wrażliwości układów stochastycznych, zawierają jednocześnie najważniejsze wyniki badań. Ich lektura pozwala stwierdzić, że podstawowe cele rozprawy zostały zrealizowane. W podrozdziale 2.7 Autorka opisała bardzo szczegółowo wyniki modelowania i analizy wrażliwości ogromnego podwieszanego mostu zbudowanego w Malezji. Z dużym uznaniem przyjąć należy próbę odtworzenia niedostępnych zazwyczaj danych dotyczących montażu mostu, takich jak naprężenia wstępne w kablach, strzałki ugięcia wstępnego płyty mostu „ku górze”, danych materiałowych wykorzystywanego kompozytu itp. Wyniki analizy omówione w podrozdziale 2.8 wskazują na potrzebę stosowania omówionych w rozdziale 2 algorytmów wrażliwości. Dość podobne wnioski wynikają z lektury rozdziału 3-go. Matematyczna elegancja, przejrzystość, częste nawiązania do elementarnych metod numerycznych są niewątpliwą zaletą, czynią ten rozdział dodatkowo atrakcyjnym ze względów dydaktycznych.

Istotne cechy nowatorstwa nosi opracowany przez Autorkę program numeryczny. Wyniki testów numerycznych potwierdzają poprawność i przydatność rozwiniętych metod obliczeniowych.

3. Uwagi ogólne.

1 Autorka wykorzystwała liczące się w skali kraju osiągnięcia swojego promotora i jego grupy badawczej w odniesieniu do problematyki analizy wrażliwości. Część pracy zawiera informacje obecnie dostępne we wszystkich podręcznikach, np. opis elementów skończonych zajmuje aż 9 stron (str. 18 -26) podczas gdy trudne pojęcia związane na przykład z funkcjonalami odpowiedzi układu G (str 34) zajmują Autorce niewiele ponad 4 linijki.

2 Na stronie 89 Autorka przyznaje, że analizując dużą kopułę prętową pominęła wpływ śniegu i wiatru. Jest to uproszczenie nie do końca zrozumiałe - znamy wiele awarii tego typu konstrukcji wywołanych takim właśnie obciążeniem.

3 Doktorantka słusznie dostrzega ogromne zagrożenie rezonansem w przypadku skomplikowanych konstrukcji wykazujących cechy symetrii lub zawierającej okresowo powtarzające się elementy. Problem dotyczy przede wszystkim wirujących wałów ale również wielu konstrukcji budowlanych, w tym mostów podwieszanych. Z rozwiązania równania 2.121 strona 33 rozprawy uzyskujemy wtedy co najmniej kilka powtarzających się (równych sobie) wartości własnych. Odpowiadające tym wartościom własnym wektory własne są liniowo zależne co prowadzi do powstania osobliwej macierzy wektorów własnych, która staje się wtedy nieróżniczkowalna względem parametrów projektowych. Propozycje rozwiązania tego bardzo ważnego problemu numerycznego można znaleźć w pracach W.C Millsa Currana (1988) lub C.M. Mota Soares, V.M. Franco Correia (1997). Jak

poradzano sobie z tym zagadnieniem w programie numerycznym Autorki?

4 Autorka nie podaje szczegółowych informacji o dokładności, jednoznaczności i/lub zbieżności obliczeń nieliniowych. To samo dotyczy obliczeń wrażliwości. Wiadomo że weryfikacja oprogramowania jest zawsze bardzo trudnym zadaniem ale niektóre metody: porównania z dostępnymi wynikami eksperymentów czy liczenia wskaźnika uwarunkowania nawet bardzo dużych układów równań nie są zbyt kosztowne a mogłyby częściowo usunąć obawy związane z problemem wiarygodności obliczeń.

5 Powyższa uwaga krytyczna nie zmienia mojego przekonania, że wyniki uzyskane przez Doktorantkę są pewne i cenne. Sposób modelowania zarówno mostu jak i kopuły prętowej są zgodne z wszelkimi zasadami sztuki a kwestia dalszej weryfikacji wychodzi poza założony ambitnie zakres rozprawy.

Uwagi szczegółowe

Strona + nr wiersza od góry - nr wiersza od dołu:

4 + 15 Zmienna teta nie może być warunkiem (Terminal time condition) Warunek wyrażamy równaniem, nierównością, warunkiem logicznym itp.

57 +18 lepiej aby rola inżynierskiego instynktu przy projektowaniu tak złożonych konstrukcji była zredukowana do minimum

58 niezgodność numerów rysunków w ich opisie w tekście z numeracją pod rysunkami 2.35, 2.36 2.31-2.32

W przypadku publikowania rozprawy lub jej części warto dokonać dalszej weryfikacji poprawności językowej. Tekst jest napisany w miarę poprawnie, ale w wielu fragmentach wygląda na dosłownie tłumaczony z polskiego słowo po słowie. Wiele sformułowań byłoby całkowicie niezrozumiałych dla osoby anglojęzycznej.

Poniżej zamieszczam komentarze do tylko kilku wybranych ale typowych usterek językowych.

7 +1 co znaczy amazing pace? "in an amazing pace" = "w niesamowitym tempie", stylistycznie zamiast "in" powinno być "at"

7+ 2 ... basis of functioning... zły styl to jest dosłownie tłumaczone z polskiego, po angielsku nie ma sensu

7 -4 This method challenges to tez niepoprawnie, nie rozumiem o co chodzi

9 -5 to nie jest paper powinno być "research", "disertation" albo po prostu "work"

10 +13 styl szyk zdania jest niewłaściwy

10 -15 często powtarzająca się nieprawidłowość stylu : During the load cases determining, powinno być "At the stage of determining the load cases the dynamic effects..." albo coś w tym stylu

10 -3 the programs to generating winno byc to generate (tez powtarza się w wielu miejscach)

11 -5 -4 ...with using...! **bez "with"**

27 +17 winno być: is to incorporate

33 +6 winno być: Let us adopt

34 + 3 i w wielu innych miejscach Let us assume

41 +1 chyba niepotrzebne with... **plus** styl tego zdania jest mocno niedoskonały.

To niestety są tylko przykłady.

4. Podsumowanie.

Strona merytoryczna rozprawy nie budzi zastrzeżeń. Poprzez implementację bardzo złożonej matematycznie teorii do kodu obliczeniowego oraz wykonanie zaawansowanych obliczeń Doktorantka udowodniła swoje bardzo wysokie kwalifikacje mechanika i numeryka specjalizującego się w problematyce obliczeń konstrukcji drgających i / lub narażonych na utratę stateczności.

Drobne uwagi krytyczne nie umniejszają w żadnym stopniu ogromnej wartości przedstawionej rozprawy doktorskiej. Zawiera ona szereg bardzo ważnych i

nowych wyników uzyskanych przez Autorkę w trakcie pracy badawczej.

Istotną wagę mają praktyczne aspekty badań związane z opracowanym oprogramowaniem. Należy podkreślić nowoczesność tematyki rozprawy oraz realizację zasadniczych celów pracy.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr Hanny Weber spełnia wymagania Ustawy o stopniach i tytule naukowym i może być przedmiotem publicznej obrony.

W. Sosnowski

Dr hab. inż. Janusz Niczyj

ul. Ku Słońcu 6/1
71-073 Szczecin
e-mail: niczyj@zut.edu.pl

Szczecin, 15.04.2014 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Hanny Weber

pt. *Numerical Analysis of Static and Dynamic Sensitivity of Complex Structural Systems with Random Parameters*

(„Numeryczna analiza wrażliwości statycznej i dynamicznej złożonych układów konstrukcyjnych z parametrami losowymi”)

1. Wprowadzenie

Rozprawa doktorska mgr inż. Hanny Weber pt. „*Numerical Analysis of Static and Dynamic Sensitivity of Complex Structural Systems with Random Parameters*” została wykonana na Wydziale Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Jej promotorem jest dr hab. Tran Duong Hien, prof. ZUT. Recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana WBiA dr hab. inż. Marii Kaszyńskiej, prof. ZUT, z dn. 10.03.2014 r. wydanej na mocy uchwały Rady Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, z dnia 05.03.2014 r.

Opiniowaną rozprawę doktorską przedstawiono na 150 stronach maszynopisu (z rysunkami i tabelami w tekście, załącznikami). Wykaz literatury obejmuje 68 pozycje i 4 materiały dodatkowe. Treść rozprawy podzielono na 4 rozdziały z wyraźnym podziałem na analizę deterministyczną (rozdział 2) i stochastyczną (rozdział 3). Praca napisana obustronnie na kartkach w języku angielskim, czcionką 12 pkt., odstęp między wierszami – 1 interlinia. Na początku pracy znajdują się dwa jednostronicowe streszczenia w języku angielskim i polskim, spis treści oraz wykaz oznaczeń użytych w pracy. Załączniki A, B i D (str.137÷150) są „listingami” danych wejściowych analizowanych konstrukcji i parametrów sterujących metodą rozwiązywania oraz postacią uzyskanych wyników obliczeń numerycznych za pomocą programu POLSAP. Załącznik A – analiza dynamiczna mostu podwieszonego, B – kopuły prętowej, D – program w języku programowania Fortran, obliczający macierz kowariancji dla układów belkowych składających się z 80 elementów. Integralną częścią pracy jest także załącznik w postaci płyty CD zawierającej dwa pliki: treść pracy doktorskiej i jej streszczenia.

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy problemu statycznej i dynamicznej wrażliwości układów o wielu stopniach swobody, z uwzględnieniem losowych parametrów projektowych. Stosując metodę perturbacji w otoczeniu wartości średnich wyprowadzono reakcje układu oraz pierwsze i drugie momenty probabilistyczne statycznej i dynamicznej wrażliwości. Doktorantka w wyniku przeprowadzonych analiz uzyskała nie tylko deterministyczne statyczne i dynamiczne reakcje układu, ale także i ich wrażliwość, w postaci wartości średnich i ich wzajemnych korelacji.

2. Ocena tematu rozprawy doktorskiej

Współczesne konstrukcje inżynierskie są coraz bardziej nietypowe z uwagi na swoją formę architektoniczną, zastosowane nowoczesne materiały konstrukcyjne i uwzględnianie nietypowych obciążeń, a więc bardziej złożone. W wielu przypadkach niektóre z tych elementów nie jesteśmy w stanie określić jednoznacznie i należy przyjąć ich nieprecyzyjność. Można to zrobić przyjmując elementy analizy probabilistycznej, teorii zbiorów rozmytych czy analizy przedziałowej do metod numerycznych. Na etapie projektowania konstrukcji często nie wykonuje się żadnych obliczeń dynamicznych układu. Zjawisko drgań zaniedbywane w fazie projektowania obiektów budowlanych często stanowi potem problem w fazie użytkowania. MES pozwala w szybki sposób sprawdzić wiele wariantów rozwiązań i wybrać rozwiązanie optymalne.

Model konstrukcji powinien być zastosowany do rozwiązywania wielu inżynierskich problemów związanych z analizą zachowania się konstrukcji pod wpływem różnych oddziaływań, modyfikacją oraz optymalizacją własności konstrukcyjnych. Metody modyfikacji konstrukcji wywodzą się wprost z MES i są oparte na aparacie matematycznym umożliwiającym badanie wrażliwości zachowania się modeli na zmiany ich parametrów projektowych. Jest to narzędzie wspomagania procesu projektowania obiektów, w których istotnym wskaźnikiem jakości konstrukcji jest także jej zachowanie się w warunkach dynamicznych. Zastosowanie analizy modalnej do rozwiązywania zagadnień badawczych i inżynierskich wskazuje na uniwersalność i efektywność tej metody, która do tej pory nie знаła szerszego zastosowania w praktyce polskich biur projektowych.

Wg EN 1991.2.2. (3) „W przypadku gdy można oczekiwać, że wystąpią efekty rezonansu zaleca się, aby *model obliczeniowy był określony na podstawie specjalnej analizy dynamicznej*”, lub wg PN-EN 1990: 2004 „zaleca się w stanie granicznym użytkowalności konstrukcji lub elementu konstrukcji, dokonania *bardziej szczegółowej analizy odpowiedzi konstrukcji, z uwzględnieniem tłumienia*.” Przedstawiony przez Autorkę model obliczeniowy konstrukcji spełnia właśnie te wymogi normowe i pozwala na takie zaprojektowanie ustroju nośnego, aby możliwie uniknąć równości częstotliwości drgań własnych i częstotliwości wzbudzenia, czy umożliwiającą redukcję zjawiska dudnienia.

Podstawowym problemem analizy wrażliwości jest wyznaczenie pochodnej niejawnych zmian odpowiedzi systemu (np. przemieszczeń, sił wewnętrznych, częstości drgań własnych konstrukcji) wywołanych przez zmiany zmiennych wejściowych (zmiennych projektowych np. pola przekrojów elementów prętowych, grubość powłok). Gradient funkcjonu odpowiedzi konstrukcji określa zmiany w odpowiedzi konstrukcji na zmianę parametrów projektowych. Stosowane są głównie trzy metody rozwiązywania tego problemu: metoda różnic skończonych, metoda zmiennych sprzężonych i metoda bezpośredniego różniczkowania. Metoda różnic skończonych prosta do implementacji numerycznej, ale jest niedokładna dla wielu zagadnień tym bardziej nieliniowych. Metoda sprzężona jest efektywna w przypadku małej liczby funkcjonu odpowiedzi. W praktyce inżynierskiej trudno uzyskać rozwiązanie dokładne (analityczne) dlatego dla układów złożonych stosuje się metody przybliżone, tj. metodę elementów skończonych.

Analiza wrażliwości odgrywa szczególnie ważną rolę gdy mamy do czynienia z konstrukcją nietypową, której analizie podjęła się Doktorantka w pracy doktorskiej, której zachowanie się na zmiany w trakcie użytkowania jest trudne do określenia. Może ona być także stosowana w diagnostyce istniejących konstrukcji czy w identyfikacji jej parametrów.

Zasadniczym celem przedstawionej rozprawy doktorskiej jest numeryczna niestatystyczna analiza statyki, dynamiki i wrażliwości układów złożonych z uwzględnieniem de-

terministycznych i losowych charakterów parametrów. W obliczeniach stochastycznych bazuje się na zastosowaniu metodologii perturbacyjnej drugiego rzędu do Metody Elementów Skończonych (MES), która uwzględnia losowość w geometrii, własnościach materiałowych czy przyjętym obciążeniu. Wiodącym celem pracy jest stworzenie nowego komputerowego otoczenia programowego, które umożliwi analizę wrażliwości układów o wielu stopniach swobody. Jest to bardzo ważny element dla praktycznego projektowania obiektów i znacznie poprawiający ten proces. Głównym celem przedstawionych działań jest znalezienie optymalnego tzw. punktu projektowego dla układu rzeczywistego uwzględniającego wiele elementów, których wcześniej nie uwzględniano.

Na intensywność amplitud przemieszczeń mają wpływ dwa zjawiska dynamiczne: rezonans elementów konstrukcji i zjawisko dudnienia. Zjawisko dudnienia związane jest z dodawaniem się wymuszeń dynamicznych o bardzo zbliżonych częstotliwościach. Zaobserwowane efekty dudnienia układów można wyeliminować przy wykorzystaniu dodatkowych mas i tłumików. Tłumienie wielomodalne, czyli odpowiednie rozmieszczenie elementów tłumiących w odpowiedniej konfiguracji na drgającej konstrukcji, jest jedną z współcześnie rozwijanych metod redukcji ich drgań. Pasywne tłumiki mogą dodatkowo zapewnić modyfikację częstości drgań własnych całej konstrukcji.

Podjęty przez Doktorantkę temat badawczy jest więc aktualny, trudny pod względem zastosowanego aparatu matematycznego, ciekawy i celowy zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

3. Merytoryczna treść rozprawy doktorskiej

W rozdziale pierwszym przedstawiono genezę tematu, przegląd stanu wiedzy dotyczącego badanego zagadnienia oraz cel i zakres rozprawy doktorskiej.

W rozdziale drugim rozpatrywana jest analiza deterministyczna wrażliwości statycznej i dynamicznej układów o wielu stopniach swobody. Problem rozwiązano za pomocą metod bezpośredniego różniczkowania. Przedstawiono dynamiczną wrażliwość układu przy przyjęciu określonego przedziału czasu działania na układ, otrzymując wzór na gradient funkcjonatu odpowiedzi konstrukcji względem zmian zmiennych projektowych (2.151) oraz przy przyjęciu czasowych impulsów jednostkowych dla określonego przedziału czasu $[0, T]$ (2.160). Następnie przedstawiono przykład trzy prętowej kratownicy, której obliczenia wykonano za pomocą programu POLSAP i porównano z rozwiązaniem zawartym w klasycznej literaturze problemu, Choi i Kim [12]. Wyznaczono statyczną wrażliwość przemieszczeń węzłów oraz dynamiczną wrażliwość drgań własnych przy przyjęciu przekrojów poszczególnych prętów jako zmienne decyzyjne. Drugi przykład dotyczy belki wspornikowej dla której w analizie określono wrażliwość drgań własnych na zmianę pola przekroju poprzecznego elementów przy przyjęciu pierwszej formy drgań własnych. Autorka dochodzi do spodziewanego wniosku, że dla 1-szej częstości drgań własnych najbardziej wrażliwym na zmianę pola powierzchni przekrojów jest przekrój w miejscu zamocowania wspornika.

Dużym analizowanym przykładem w pkt.2.7 w ramach prezentowanej teorii jest analiza mostu podwieszonego. Model o 3563 stopniach swobody oparto na rzeczywistym obiekcie wybudowanym w Malezji o złożonej nietypowej konstrukcji w formie żagla statku. Doktorantka dokonała wielu zmian przystosowując charakter obciążeń, materiały i lokalizację w Polsce. W dyskretyzacji konstrukcji użyto trzy typy elementów skończonych: kratowe (154), belkowe (510) i powłokowe (635), których charakterystyki przedstawiono w pkt.2.3. Typ zastosowanego elementu skończonego wynika z charakteru elementu konstrukcyjnego: płyta mostowa żelbetowa, pylon żelbetowy, łuki i dźwigary

stalowe, wanty ze splotów drutów stalowych. Odpowiednie zamodelowanie konstrukcji by spełnione były warunki normowe wg Autorki stworzyło wiele problemów. Związane to było przede wszystkim ze spełnieniem warunku sztywności przęsła mostu. Po przeprowadzeniu wielu analiz i konsultacjach eksperckich Doktorantka przyjęła, że płyta wykonana jest ze specjalnego kompozytowego materiału o podwyższonej wytrzymałości, wzmocniona stalowymi podłużnicami i poprzecznkami. Proces ten był jakby pierwszym krokiem badania wrażliwości modelu na różne elementy by spełnione były warunki normowe. Obciążenie wiatrem przyjęto w sposób statyczny i uproszczony opierając się na pracy Biliszczuka z 2005 r. Z uwagi na teoretyczny charakter dysertacji Doktorantka w analizie statycznej przyjęła wiele uproszczeń związanych z charakterem i wielkością obciążeń. W tabelach przedstawiono przemieszczenia i kąty obrotu węzłów (tab.2.7) oraz siły wewnętrzne (tab.2.8÷2.9) dla reprezentatywnych elementów belkowych i powłokowych modelu konstrukcji. Brak rysunków odkształceń statycznych konstrukcji.

W rozwiązaniu równania ruchu ciała przedstawionego przy pomocy elementów skończonych zasadniczo stosuje się dwie metody: metodę całkowania bezpośredniego i metodę superpozycji modalnej. W metodzie całkowania bezpośredniego przyjmuje się krok całkowania $\Delta t \leq T_n/\pi$, gdzie T_n – najmniejszy okres drgań układu. Niespełnienie tego warunku powoduje akumulację błędów całkowania i zaokrąglenia w trakcie rozwiązywania równania ruchu. W pracy ten warunek został spełniony. Gdy liczba kroków i liczba stopni swobody układu jest duża, posługujemy się metodami niejawnymi (implicite), do których można zaliczyć, metodę superpozycji modalnej, którą Doktorantka przyjęła w obliczeniach numerycznych. W wyznaczeniu macierzy tłumienia $\mathbf{C}$ przyjęto model tłumienia proporcjonalnego, w którym macierz tłumienia jest opisana liniową kombinacją macierzy sztywności i macierzy mas $\mathbf{C} = \alpha \mathbf{K} + \beta \mathbf{M}$ (model tłumienia Rayleigha). Współczynniki α i β wyznaczamy na podstawie udziału poszczególnych postaci drgań własnych w dynamice układu. Model tłumienia proporcjonalnego, choć nie mający fizycznego uzasadnienia, sprawdza się w przypadkach małego tłumienia tzn. poniżej 10% tłumienia krytycznego. Tłumienie wewnętrzne ($\beta \mathbf{K}$) rośnie szybko z rosnącą częstotliwością drgań własnych, co oznacza, że wyższe formy drgań zanikają szybciej, niż niższe. Nie ma to miejsca dla tłumienia zewnętrznego drgań.

W analizie dynamicznej mostu wantowego przyjęto obciążenie w postaci siły dynamicznej o wartości 10000 kN działającej w czasie 40 sekund na górny węzeł pylonu w kierunku podłużnym mostu. Zagadnienie własne rozwiązano dla 12 pierwszych form drgań własnych przyjmując metodę superpozycji modalnej z 10000 kroków czasowych co $\Delta t = 0,004$ s. W tab.2.10 pokazano otrzymane wartości tylko siedmiu pierwszych częstotliwości własnych i ich okresy dla przypadku układu nietłumionego. Daje się zauważyć, że otrzymano parami bardzo zbliżone częstotliwości drgań własnych ω np. 4.68, 4.97, 7.14, 7.77 rad/s. Obliczone wyniki odpowiedzi dynamicznych układu prezentowane są dla dwóch przypadków, bez i z uwzględnieniem modalnego współczynnika tłumienia $\lambda = 0,01$.

Na wykresie przedstawionym na rys.2.36, przedstawiono harmoniczną zmianę amplitudy przemieszczeń pionowych płyty i przemieszczeń wzdłuż mostu wierzchołka pylonu. Jak widać ich charakter pokazuje możliwość wystąpienia zjawiska dudnienia. To zjawisko można obserwować dla obiektów regularnych o powtarzalnych elementach geometrii i jest ono konsekwencją nakładania się drgań o przybliżonej częstotliwości. Autorka pisze, że ten niekorzystny efekt dla konstrukcji musi być eliminowany, elementem hamującym ten proces w drganiach analizowanych układów jest przyjęta wartość modalnego współczynnika tłumienia $\lambda = 0,01$. Autorka stwierdza, że na podstawie uzyskanych wykresów przemieszczeń dynamicznych, rys.2.36, można wyciągnąć błędny wniosek,

że tłumienie to może być wystarczające do eliminacji dudnienia. Jak pokazują wykresy dynamicznych sił wewnętrznych, rys.2.37-2.38, zastosowanie w obliczeniach współczynnika λ zmniejsza skalę drgań, ale ich charakter okresowych zmian amplitud jest zachowany.

Następnie Autorka rozpatruje wrażliwość wartości własnych w odniesieniu do zmian pola powierzchni przekroju poprzecznego dla określonych elementów kratowych i belkowych oraz płytowych w przypadku zmian ich grubości. Wyniki przedstawiono dla pierwszych trzech częstości drgań własnych. Stwierdzono, że wartości własne są bardziej wrażliwe na zmianę pola przekrojów poprzecznych tylnych kabli konstrukcji łączących pylon z łukami i stabilizujących pylon. Te elementy są prawdopodobnie krytycznymi (istotnymi) dla nośności całej konstrukcji. Wniosek ten wyciągnięty po przeprowadzonych obliczeniach, uzasadnia pierwsze próby Doktorantki w fazie przyjęcia modelu obliczeniowego konstrukcji.

Na początku rozdziału trzeciego wychodząc ze stochastycznej wersji równań Lagrange’a przedstawiono analizę stochastyczną niezależnych zmiennych losowych zadanych przez pierwsze dwa centralne momenty probabilistyczne: wartości średnie i kowariancje wzajemne. Zmienne losowe zostały rozwinięte w otoczeniu wartości średnich w szereg Taylora do drugiego rzędu. W ramach metody perturbacyjnej drugich momentów liniowy układ równań różniczkowych o wielu stopniach swobody zawiera operator różniczkowy i wektor sygnałów wyjściowych z jawnymi funkcjami wektora parametrów losowych. Sygnały wyjściowe są niejawnymi funkcjami wektora parametrów losowych i czasu, względem których są dwukrotnie różniczkowalne.

Dalej Autorka w wyniku przeprowadzonych przekształceń dochodzi do układu równań hierarchicznych dla układów statycznych i dynamicznych (pkt.3.4) i określa wartości średnie i kowariancje wzajemne przemieszczeń węzłowych i naprężeń dla dowolnego punktu wewnątrz elementu. Układ równań hierarchicznych można już zastosować do implementacji komputerowej. W podrozdziale (3.6) przedstawiono wrażliwość stochastyczną statyczną i dynamiczną układu o wielu stopniach swobody. Następnie przedstawiono wrażliwości chwilowe w analizie której układ jest obciążony serią impulsów działających w nieskończenie małym czasie. Osobny podrozdział (3.7) zawiera analizę numeryczną układów kratowych i belkowych z pokazanymi występującymi efektami dudnienia.

Rozważania teoretyczne poparto analizą stalowej symetrycznej kopuły składającej się z 80 elementów o przekroju rurowym. Przyjęto do analizy cztery modele obliczeniowe: model przestrzennej kratownicy i trzy układy belkowe o różnym podziale na elementy. Przedstawiono analizę statyczną, dynamiczną i wrażliwości tych układów. Dla przejrzystości analizy jako obciążenie statyczne przyjęto jedną pionową siłę skupioną o wartości 1000 kN przyłożoną do wierzchołka kopuły.

Do analizy stochastycznej przyjęto jako zmienne losowe pola przekroju poprzecznego 80. elementów, których potrzebne kowariancje wzajemne obliczono za pomocą napisanego przez Doktorantkę, w języku programowania Fortran, programu generującego macierz kowariancji (Załącznik D). Istotnym elementem otrzymania niezerowej i diagonalnej macierzy było odpowiednie przyjęcie po wielu próbach parametru sterującego obliczeniami θ .

Przyjęta metoda perturbacji drugiego rzędu związana jest z założeniem aby odchylenie standardowe wartości oczekiwanej było mniejsze niż 15 %. Dlatego do analiz przyjęto trzy wartości współczynnika wariacji $\alpha=0.05, 0.10$ i 0.15 . Uzyskane wartości średnie z analizy stochastycznej porównano z wartościami deterministycznymi przemieszczeń

uzyskując największe różnice $\sim 2,2\%$ dla węzła wierzchołka kopuły. Porównania są wykonane dla poszczególnych pierścieni konstrukcji. Następnie kopułę poddano analizie dynamicznej obciążonej podobnie jak w przypadku statycznym siłą pionową równą 1000 kN przyłożoną do wierzchołka kopuły i działającą 2 sekundy. Częstotliwości własne obliczono za pomocą programów POLSAP i ROBOT, uzyskując zbliżone wartości parami. Pokazano, że amplituda drgań zmienia się harmonicznie w czasie i wykazuje charakterystyki związane ze zjawiskiem dudnienia.

Przyjęty współczynnik tłumienia modalnego $\lambda=0,01$ nie eliminuje dudnienia, zmniejsza tylko amplitudę drgań. Po wielu testach i próbach Doktorantka formułuje wniosek, że wyeliminować można to zjawisko poprzez wprowadzenie dodatkowej masy w wierzchołku kopuły. Dodanie masy zredukowało i zmniejszyło, trzy pierwsze częstotliwości, które były związane z wystąpieniem dudnienia konstrukcji i znacznie zmniejszyło amplitudę drgań. Następnie obliczano kopułę przyjmując jako zmienne losowe pola przekroju poprzecznego prętów i współczynnik kowariancji $\alpha=0,05$. Na rysunkach przedstawiono wykresy wariancji i kowariancji wzajemnej przemieszczeń wybranych punktów.

W analizie wrażliwości funkcjonal odpowiedzi konstrukcji przyjęto ze spełnienia warunku nieprzekroczenia przemieszczeń dopuszczalnych węzła. Przykładowo przedstawiono wrażliwość przemieszczenia węzła górnego 31 na zmianę pola przekroju pręta szczytowego 78 – wartość średnia analizy stochastycznej.

Następnie przyjęto modele belkowe kopuły, dzieląc elementarne pręty w połowie długości, otrzymując układ złożony ze 160 elementów oraz na cztery części otrzymując 320 elementów skończonych, przy pozostawieniu wymiarów i geometrii wyjściową kopuły. Porównano model kratowy i belkowe w zakresie analizy deterministycznej i stochastycznej, przeprowadzając taki sam rodzaj obliczeń. Dla kopuły 160 elementowej wykonano analizę dla różnych wartości współczynnika bezwładności dodanej masy określonego dla różnych dyskretyzacji, $i=0,01, 0,02$ i $0,03$.

W rozdziale czwartym zawarto wnioski i uwagi końcowe.

4. Ogólna ocena pracy

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy ważnego nurtu aktualnych badań naukowych zajmującego się właściwym przyjęciem modelu obliczeniowego złożonych konstrukcji uwzględniającego wiele nieprecyzyjnie określanych elementów mogących wystąpić w czasie ich użytkowania. Są to zagadnienia istotne z punktu widzenia zarówno bezpieczeństwa konstrukcji jak i optymalnego ich projektowania. Lektura rozprawy doktorskiej dowodzi, że Autorka ma bardzo dobre rozeznanie w przedmiotowych tematach. Rozprawa doktorska ma charakter studium teoretycznego i analizy numerycznej.

Mgr inż. Hanna Weber zaproponowała wykorzystanie trudnego zagadnienia uwzględnienia parametrów losowych w analizie wrażliwości statycznej i dynamicznej złożonych układów konstrukcyjnych do rozwiązywania praktycznych zadań w projektowaniu budowli. Dlatego pozytywnie należy ocenić przedstawione propozycje. Na podkreślenie zasługuje wkład Doktorantki w poszukiwaniu nowoczesnych metod rozwiązywania trudnych problemów teoretycznych w analizie złożonych konstrukcji.

Treść pracy poprowadzona konsekwentnie z przyjętym wiodącym problemem do rozwiązania z właściwą kolejnością przeprowadzanych przekształceń i zależności. Wzory (271), rysunki (72) i tablice (25) wykonano bardzo starannie, czytelnie i z właściwym opisem.

W ramach przeprowadzonych analiz wrażliwości dynamicznej, analizowano jak zmiana pola przekroju poprzecznego poszczególnych elementów wpływa na przemieszczenia poszczególnych wybranych punktów. Można zaobserwować wzrost wrażliwości układu dynamicznego w czasie i występowanie zjawiska dudnienia. Na podstawie tych analiz Autorka wysuwa wniosek, że w dalszych badaniach należy wyeliminować wspomniany efekt poprzez zastosowanie skupionych mas w wybranych węzłach.

Autorka na podstawie analiz różnych układów konstrukcyjnych wskazuje na przyczyny powstania efektu dudnienia, który należy eliminować przez dodanie mas w wybranych punktach konstrukcji indywidualnie dla danej konstrukcji. Dudnienie można także efektywnie wyeliminować dodając masy w tych samych węzłach (punktach) w których przyłożona jest siła dynamiczna. W pracy problem eliminacji dudnienia pokazano za pomocą obliczeń numerycznych. Doktorantka wskazuje, że kulminacją tych prac będzie rozwinięcie tych praktycznych problemów w przyszłych badaniach naukowych.

Metodologia komputerowa jest oparta na tradycyjnej Metodzie Elementów Skończonych, wzbogaconej metodą perturbacji stochastycznej i jej podejściem drugiego rzędu. W przeciwieństwie do rozwiązań bezpośrednich, metoda funkcji odpowiedzi jest zastosowana do obliczeń probabilistycznych momentów drugiego rzędu i współczynników wartości własnych konstrukcji. Zostały one wyznaczone na podstawie kilku rozwiązań zagadnienia deterministycznego w otoczeniu wartości średnich odpowiednich parametrów losowych.

W przypadku układów równań hierarchicznych perturbacyjnej analizie stochastycznej poddaje się rozwiązaniu jeden układ zerowego rzędu (3.47), po jednym układzie pierwszego rzędu dla każdej zmiennej losowej (3.48) i jeden układ drugiego rzędu (3.49). Uzyskane w rozwiązaniu dwa pierwsze momenty centralne zmiennych stanu względem zmiennych projektowych w otoczeniu rozwiązania początkowego, w tym wypadku średniego, daje możliwość oceny zachowania się konstrukcji przy losowych charakterystykach zmiennych projektowych. W porównaniu do metod statystycznych (np. Monte Carlo) pewnymi mankamentami tej metody są zmienne, które muszą spełniać warunki małej fluktuacji i ciągłości względem argumentów. Zaletą zaś, że nie jest konieczne założenie normalnego rozkładu parametrów losowych i na wejściu wystarczą dwa pierwsze momenty centralne.

W analizie Doktorantka przyjęła celowo pełną symetrię geometrii konstrukcji w odniesieniu do układu elementów i usytuowania podpór. Ponieważ ten typ konstrukcji ma zbliżone częstości, co było istotnym założeniem we właściwym przeprowadzeniu ich obliczeń numerycznych.

5. Uwagi ogólne i szczegółowe

Omówienie literatury w rozdziale pierwszym nie ma wystarczającego charakteru krytycznego. Brak jest jej omówienia pod kątem możliwych obszarów naukowych, których analizą należało się zająć dla postawionej przez Doktorantkę tezy pracy. Autorka w bibliografii powołuje się na klasyczne monografie dotyczące statyki, dynamiki i analizy wrażliwości układów. Brak jest natomiast wystarczającego i reprezentatywnego przeglądu literatury związanego z tematyką analizowanego problemu w czasopiśmie naukowych. W całej pracy Autorka powołuje się na pozycje z bibliografii stosując tylko numer pozycji, czyli np. „zawarte w [X]”, co wydaje się w wielu przypadkach mało czytelne z uwagi na brak informacji autorskiej źródła powołania.

Rozdział drugi pracy (pkt.2.1÷2.3, str.13÷26) zawiera elementarne podstawowe informacje dotyczące zdefiniowania MES i elementów skończonych dla elementu kratowego, belkowego i powłokowego, które w moim przekonaniu w rozprawie doktorskiej nie powinny być zamieszczane.

Brak w pracy prostego przykładu pokazującego zastosowanie rozwiązania układu hierarchicznego dla otrzymania wzorów na pierwsze dwa momenty probabilistyczne przy przyjęciu jednego z parametrów mającego charakter losowy, nadałoby to prezentowanej trudnej teorii większej przejrzystości.

Analizę statyczną kopuły prętowej wykonano niezależnie za pomocą dwóch programów: POLSAP i ROBOT. Zwiększono dokładność otrzymanych wartości przemieszczeń węzłów w celu uwidocznienia ich różnic otrzymanych z tych programów. Małe różnice rzędu 3% pozwoliły na ostateczne przyjęcie danego modelu do dalszej analizy. Wydaje się, że te działania mające dowodzić prawidłowości przyjętego modelu są niepotrzebne dla przyjętej tematyki rozprawy.

Brak rysunków odkształceń i postaci drgań własnych mostu podwieszonego i kopuły prętowej. Mogłyby one dać informację czy tak otrzymane zbliżone wartości częstości drgań własnych są sprzężone z podobnym rodzajem drgań konstrukcji dla sąsiednich częstościach drgań własnych (czy to są drgania giętne, skrętne, giętno-skrętne). Jest to pewnym utrudnieniem w przeprowadzeniu interpretacji zachowania się konstrukcji jak i określenia przyczyn występowania dudnienia.

Analizując układ pracy, zauważalny jest brak sprzężenia pomiędzy przedstawioną teorią a przyjętymi przykładami. Doktorantka w uzyskanych rozwiązaniach konstrukcji nie pokazuje na jakich wzorach, zależnościach przedstawionych w pracy otrzymuje się wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych. Przykłady są rozwiązane za pomocą programów komputerowych POLSAP i ROBOT. Doktorantka nie przedstawia (oprócz „listingów” sterujących danych wejściowych zawartych w Załączniku) na jakich metodach numerycznych zbudowane są te programy i jak one są powiązana z teorią przedstawioną w pracy doktorskiej. POLSAP jest programem kilkudziesięcioletnim, a więc sztywnym i nie mającym tak rozwiniętych modułów graficznych, co może być przyczyną braku rysunków odkształceń i form drgań analizowanych konstrukcji.

Autorka pisze, że połączenie analizy wrażliwości i uwzględnienie parametrów losowych w obliczaniach stochastycznych układów dowodzi dużego znaczenia każdej nie-dużej nieprecyzyjności parametrów projektowych na otrzymane wyniki.

Statyczna i dynamiczna stochastyczna analiza wrażliwości jest efektywnym narzędziem w projektowaniu współczesnych konstrukcji dająca pełną informację o pracy poszczególnych elementów i całej konstrukcji.

Dla układów o wielu stopniach swobody istotne są przyjęte parametry metod obliczeniowych by uzyskać efektywne metody analiz. Doktorantka wskazuje na przyjęcie właściwego kroku czasowego w analizie dynamicznej dla otrzymania rzeczywistego obrazu wrażliwości i przemieszczeń w czasie.

Uwagi szczegółowe:

- 1) W rozprawie zabrakło wyraźnie postawionej tezy. Wprawdzie rolę tę w pewnym sensie pełni określenie celu i zakresu pracy.
- 2) W opisie tablic 2.1÷2.3 błąd w nazwie programu, jest POSAP, powinno być POLSAP.

- 3) Dla danych materiałowych, wymiarów i charakterystyk geometrycznych przekroju belki wspornikowej przedstawionej w pkt.2.6.2 nie podano ich jednostek.
- 4) Zawarto błędne numery rysunków w tekście, str.58, jest - rys.2.35, rys.2.31-2.32, powinno być rys.2.36, 2.37-2.38.
- 5) Doktorantka cytuje zastosowane normy PN-85/S-10030, PN-77/B-02011, PN-82/B-02001, ale wśród nich zabrakło współczesnych norm związanych z obciążeniem konstrukcji, projektowaniem konstrukcji mostów (PN-B-03207:2002, PN-EN 1993-1-3:2006 lub PN-EN 1993-1-3:2008).
- 6) W rozdziale trzecim przyjęto rozwinięcie zmiennej losowej $\mathbf{h} = \{h_r\}$, $r = 1, \dots, \check{r}$ w otoczeniu średnich $\{\check{h}\}$ w szereg Taylora. Brak we wzorach rozwinięcia w szereg Taylora znaku sumy po $\check{r}$ przed pochodnymi cząstkowymi. Mimo zawartego w pracy zdania, że „Dla przejrzystości prezentowanej teorii, zastosowano notację sumacyjną we wzorach” – str.29⁸ i pominięto symbole sumy w dalszych przekształceniach, uważam, że efekt jest przeciwny i gubione są ważne działania we wzorach przeprowadzonych analiz matematycznych.
- 7) Brak w spisie treści pracy zawartego załącznika.

6. Podsumowanie

W świetle wymienionych powyżej uwag krytycznych, pozytywnie należy spojrzeć na podstawowe parametry, które są brane pod uwagę w ocenie rozprawy doktorskiej:

- 1) Doktorantka rozwiązała postawione następujące zadania naukowe:
 - zastosowała współczesne osiągnięcia matematyki stosowanej (metodologii niestacystycznej), związane z komputerowymi technikami obliczeniowymi analizy układów stochastycznych,
 - opracowała modele numeryczne umożliwiające wykonywanie analiz wrażliwości statycznej i dynamicznej złożonych układów konstrukcyjnych,
 - pokazała uwzględnienie nieprecyzyjności parametrów projektowych określonych tylko przez dwa pierwsze momenty centralne w analizie wrażliwości.
- 2) Przedstawione rezultaty wskazują na duże znaczenie obydwu wrażliwości statycznej i dynamicznej w obliczeniach nowoczesnych konstrukcji, pozwala to także na całkowicie różne spojrzenie na indywidualną pracę poszczególnych elementów. Tą drogą możemy znaleźć najbardziej wrażliwe punkty całego układu konstrukcyjnego, co podano na przykładzie mostu podwieszanego - duża rola kabli wieszaków.
- 3) Przygotowanie merytoryczne Doktorantki w zakresie rozwiązywania problemów analizy statycznej, dynamicznej i wrażliwości złożonych układów konstrukcyjnych z uwzględnieniem losowych parametrów jest bardzo dobre, aby je uznać za wystarczające do podejmowania samodzielnych zadań naukowych
- 4) Autorka wykazała się wiedzą, komputerowymi technikami obliczeniowymi układów stochastycznych z parametrami losowymi, dobrym rozpoznaniem technik obliczeń układów prętowych, powierzchniowych i złożonych. Stwierdzam, iż koncepcja rozprawy i wykonane obliczenia numeryczne są oryginalne. Stanowi ona przyczynek do uściślenia modeli obliczeniowych konstrukcji, zwłaszcza z uwzględnieniem charakteru losowego pewnych parametrów obliczeniowych.

- 5) Ten typ analizy pozwala znaleźć tzw. punkt projektowy w rozumieniu optymalnego rozwiązania zawierającego wszystkie aspekty związane z rozpatrywanym problemem.
- 6) Praca jest napisana w sposób zwięzły, której czytanie treści może sprawiać pewne trudności dla zaproponowanej analizy matematycznej niedeterministycznych problemów statyki i dynamiki złożonych konstrukcji. Ale dzięki temu może być ona nieocenionym źródłem do prac nad implementacją komputerową inżynierskich zagadnień stochastycznych.
- 7) Dostrojenie mas i tłumików i ich położenie możliwe jest po odpowiedniej analizie dynamicznej danego układu konstrukcyjnego, zwłaszcza dla układów złożonych. Myślę, że jest to możliwy do przyjęcia przez Doktorantkę kierunek dalszych rozważań naukowych, który będzie kontynuacją przedstawionej teorii.
- 8) Uwagi krytyczne i komentarze nie umniejszają pozytywnej oceny końcowej rozprawy doktorskiej.

7. Wniosek końcowy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska świadczy o odpowiednim poziomie wiedzy, a także o dojrzałości i samodzielności naukowej mgr. inż. Hanny Weber.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Hanny Weber pt.

*„Numerical Analysis of Static and Dynamic Sensitivity
of Complex Structural Systems with Random Parameters”*

czyni zadość wymaganiom *Ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14.03.2003 r. i w związku z tym wnoszę do Rady Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

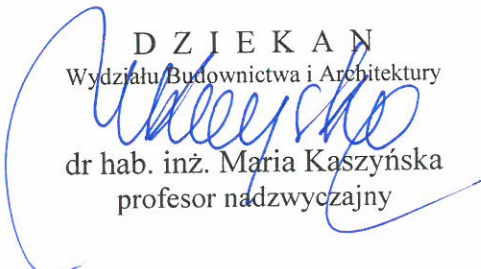


Janusz Niczyj

Uchwała
Rady Wydziału Budownictwa i Architektury
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego
w Szczecinie
z dnia 25 czerwca 2014 r.

w sprawie: **nadania mgr inż. Hannie Weber stopnia naukowego
doktora nauk technicznych w dyscyplinie *budownictwo***

Rada Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie po zapoznaniu się z przebiegiem przewodu doktorskiego, wynikami egzaminów doktorskich, opiniami recenzentów i wysłuchaniu obrony pracy doktorskiej mgr inż. Hanny Weber nt. „*Numeryczna analiza wrażliwości statycznej i dynamicznej złożonych układów konstrukcyjnych z parametrami losowymi*” (w języku angielskim: „*Numerical Analysis of Static and Dynamic Sensitivity of Complex Structural Systems with Random Parameters*”), na wniosek Komisji ds. przewodów doktorskich w dyscyplinie *budownictwo*, działając zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2011 Nr 204, poz. 1200), podejmuje uchwałę o nadaniu magister inżynier Hannie Weber stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie *budownictwo*.

D Z I E K A N
Wydziału Budownictwa i Architektury

dr hab. inż. Maria Kaszyńska
profesor nadzwyczajny