

Michał Guminiak, dr hab. inż., prof. PP
Instytut Analizy Konstrukcji Politechniki Poznańskiej
ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań
e-mail: michal.guminiak@put.poznan.pl

POLITECHNIKA BYDGOSKA
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

Wpłynęło..... 26.04.2023 r.
Numer WBA/15.....
Referent/sgmbul.....

Recenzja dysertacji doktorskiej pt.

***Model numeryczny wyboczenia dynamicznego prętów z wykorzystaniem
metody elementów skończonych***

autorstwa mgr inż. Izabeli Kasprzyk

przygotowanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Adam Podhoreckiego

oraz dr inż. Justyny Sobczak-Piąstki

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja dysertacji doktorskiej zatytułowanej *Model numeryczny wyboczenia dynamicznego prętów z wykorzystaniem metody elementów skończonych*, której autorem jest mgr inż. Izabela Kasprzyk, została opracowana na podstawie pisma z dnia 31 marca 2023 roku, wystosowanego przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa Geodezja i Transport Politechniki Bydgoskiej dr inż. Justynę Sobczak-Piąstkę zgodnie z Uchwałą Rady Naukowej z dnia 24 marca 2023 roku. Promotorem dysertacji doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Adam Podhorecki, a promotorem pomocniczym dr inż. Justyna Sobczak-Piąstka.

2. Opis dysertacji

Dysertacja doktorska, której autorką jest pani mgr inż. Izabela Kasprzyk została przygotowana w języku polskim, liczy 103 strony i została wydana w formie monografii na prawach rękopisu. Dysertacja ma budowę klasyczną i składa się z ośmiu rozdziałów, spisu literatury oraz streszczenia w języku polskim oraz w języku angielskim. Dysertacja zawiera rysunki, których numeracja przyporządkowana jest numerom kolejnych rozdziałów. Na początku pracy Autorka zamieściła podziękowanie skierowane na ręce Promotora, Promotor pomocniczej, Koleżanek i Kolegów z Uczelni oraz swojej Rodziny.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym jako wstęp, w którego skład wchodzi cztery podrozdziały, Autorka przedstawiła przedmiot opracowania, motywację podjęcia pracy nad przedstawioną tematyką, oraz definicję pojęcia stateczności układów konstrukcyjnych.

Rozdział drugi składa się z dwóch podrozdziałów i zawiera przegląd literatury poświęconej zagadnieniu utraty stateczności układów i elementów konstrukcyjnych wraz z podsumowaniem aktualnej wiedzy związanej z tematem dociekań.

W rozdziale trzecim składającym się z trzech podrozdziałów Autorka przedstawiła przedmiot i cel pracy, główną tezę i zakres rozprawy.

Rozdział czwarty składa się z ośmiu podrozdziałów i poświęcony jest opisowi zjawiska wyboczenia elementu prętowego. Zawiera matematyczne sformułowanie zadania, opis deformacji pręta, statyczne równania równowagi sformułowane dla wycinka pręta w konfiguracji zdeformowanej (sformułowanie klasyczne), równania geometryczne opisujące nieliniowe związki geometryczne łączące odkształcenia z przemieszczeniami, równania konstytutywne (fizyczne) łączące uogólnione siły z uogólnionymi odkształceniami, opis warunków brzegowych i początkowych, zastosowanie równania pracy wirtualnej (sformułowania wariacyjnego) oraz metody rozwiązywania zadań początkowo-brzegowych.

W rozdziale piątym, który jest podzielony na trzy podrozdziały, Autorka opisała równania ruchu dla zagadnień dynamiki zgodnie z ujęciem metody elementów skończonych.

W rozdziale szóstym, składającym się z czterech podrozdziałów, Autorka opisała założenia autorskiego modelu matematycznego opisującego zjawisko utraty stateczności pręta wiotkiego.

Rozdział siódmy, w którego skład wchodzi cztery podrozdziały, zawiera autorskie przykłady liczbowe. Otrzymane wyniki obliczeń zostały zestawione w tabelach oraz zilustrowane na rysunkach.

Dysertację zamyka rozdział ósmy, w którym przedstawione są dość obszerne wnioski końcowe oraz propozycje dalszych badań.

3. Uwagi krytyczne o dysertacji

3.1. Uwagi formalne

Dysertacja ma budowę kanoniczną i jest przygotowana w sposób staranny. Autorka przedstawiła w sposób prosty i zrozumiały zagadnienia dynamicznej utraty stateczności elementów konstrukcyjnych.

Dysertację otwiera niezbędny wstęp, który stanowi wprowadzenie do analizowanego zagadnienia wraz z przedstawieniem i sformułowaniem głównych tez. Następnie Autorka przedstawiła przegląd literatury, który łącznie z pozycjami cytowanymi w kolejnych częściach dysertacji obejmuje wykaz 101 publikacji związanych z podjętą tematyką dociekań. Kolejne rozdziały dysertacji tworzą zwarty ciąg rozważań naukowych popartych przykładami liczbowymi.

Na zakończenie Autorka sformułowała wnioski oraz pewne propozycje dalszych badań. Dysertację spis cytowanej literatury oraz streszczenie w językach polskim i angielskim.

3.2. Uwagi merytoryczne

Podstawowym celem badawczym, jaki zaproponowała Autorka dysertacji to opracowanie efektywnego numerycznego modelu obliczeniowego, który będzie służył do analizy zjawiska wyboczenia prętów obciążonych siłą ściskającą o charakterze dynamicznym.

Autorka stawia też następującą tezę, cyt.: „Możliwe jest uzyskanie efektywnego rozwiązania zagadnienia początkowo-brzegowego wyboczenia dynamicznego prętów z wykorzystaniem metody elementów skończonych i metod bezpośredniego całkowania”.

Zakres rzeczowy przedstawionej dysertacji obejmuje wprowadzenie do tematyki zadań stateczności konstrukcji prętowych, przegląd literatury związanej z analizowanym zagadnieniem, sformułowanie zadania wyboczenia pojedynczego pręta, opis równań ruchu (równań chwilowej równowagi dynamicznej) przy oraz ich całkowania metodą Newmarka, opis zaproponowanego modelu obliczeniowego, przykłady liczbowe oraz wnioski.

Autorka analizuje deformację pręta krępego, na którego końcach działa konserwatywne obciążenie zmienne w czasie. Deformacja ta przebiega wyłącznie w jednej płaszczyźnie, przy czym oś prostopadła do tej płaszczyzny, przechodząc przez geometryczny środek ciężkości przekroju jest osią główną. Autorka formułuje w sposób klasyczny równania równowagi (z punktu widzenia dynamiki równania chwilowej równowagi) w układzie zdeformowanym, przy założeniu nieliniowości geometrycznej. W prezentowanym modelu występują zarówno translacyjne przemieszczenia podłużne oraz poprzeczne względem osi pręta. Przemieszczenie obrotowe opisane jest przez sumę kątów pochodzących od zmiany geometrii poprzecznej rozpatrywanego elementarnego wycinka belki, co opisuje rys. 4.3. Na tej podstawie, Autorka wyprowadza układ równań chwilowej równowagi dynamicznej, przy czym wielkości małe, takie jak np. iloczyn pierwszej pochodnej funkcji siły poprzecznej i przyrostu kąta obrotu przekroju są pomijalnie małe.

Następnie zostają zdefiniowane: nieliniowy związek geometryczny wiążący ugięcie z odkształceniem względem osi pręta oraz kąt odkształcenia postaciowego wyrażony przez różnicę pierwszej pochodnej funkcji ugięcia względem zmiennej osiowej i kąta obrotu przekroju.

Kolejny etap dysertacji obejmuje przedstawienie związków fizycznych, które łączą siły normalne z podłużnymi odkształceniami liniowymi, siły poprzeczne z kątem odkształcenia postaciowego oraz momenty zginające z krzywizną. Siły wewnętrzne jak i odpowiadające im odkształcenia są funkcjami zmiennej podłużnej oraz czasu. Graficzny opis deformacji wycinka pręta ze wskazaniem elementów występujących w związkach fizycznych Autorka przedstawiła na rysunku 4.4.

Na zakończenie tego etapu, Autorka definiuje konieczne warunki brzegowe i początkowe w postaci sześciu związków, zgodnie z klasyczną definicją podaną w literaturze (Nowacki, 1972).

Wyprowadzenie równań rządzących w ujęciu wariacyjnym stanowi następny element rozważań teoretycznych. W rezultacie Autorka formułuje układ trzech równań zgodnie z zasadą pracy wirtualnej (przygotowanej) i na koniec otrzymuje warunek równowagi przez minimalizację funkcjonału energii, na którą składają się energia potencjalna, kinetyczna oraz praca sił zewnętrznych. Warunek ten Autorka zapisuje w postaci zasady Hamiltona.

W dalszym ciągu rozważań, Autorka podaje jakimi metodami można rozwiązać zadania początkowo-brzegowe – analityczną, numeryczną oraz analityczno-numeryczną. Do rozwiązania zadania Autorka zastosowała metodę elementów skończonych (MES) oraz dwuwęzłowy element

skończony o trzech stopniach swobody w każdy węzle. Element ten został przedstawiony na runkach 5.2 oraz 5.3.

Zastosowanie ujęcia metody elementów skończonych w interpretacji globalnego równania pracy wirtualnej prowadzi do wyprowadzenia związków opisujących macierze sztywności – liniową oraz dwie nieliniowe oraz macierz bezwładności. W rezultacie Autorka otrzymuje układ równań różniczkowych, niejednorodnych o zmiennych współczynnikach. Jako element oryginalny, Autorka wskazała rozwiązanie powyższego układu równań różniczkowych przy zastosowaniu elementów skończonych oraz teorii obejmującej uwzględnienie odkształceń postaciowych pręta (teorii wyższego rzędu) na proces jego deformacji.

Do rozwiązania zadania konieczne jest zastosowanie bezpośredniego całkowania równań ruchu. Autorka przytacza metody, które mogą znaleźć zastosowanie. Są to metody: różnic skończonych, Newmarka, Houbolta, Wilsona oraz Zienkiewicza-Wooda.

Podstawowymi zadaniami są: obliczenie wartości siły krytycznej (obciążenia krytycznego) zależnej od czasu dla zadanej wartości jej częstości kołowej oraz (zamiennie) krytycznej częstości kołowej wymuszenia, dla ustalonej wartości siły wymuszającej.

W prezentowanym modelu obliczeniowym Autorka zastosowała metodę Newmarka całkowania równań ruchu, przy czym podała kryterium dokładności obliczeń w procedurze iteracyjnej oraz zdefiniowała kryterium utraty stateczności.

Przykłady liczbowe obejmują wyznaczenie wartości siły krytycznej (obciążenia krytycznego) w przypadku jej statycznego działania, oraz weryfikacja otrzymanego wyniku, przy czym Autorka zakłada wstępną, małą krzywiznę pręta, a następnie, oblicza wartość obciążenia krytycznego zgodnie z zaprezentowaną teorią. Wartość ta odnoszona jest do tzw. klasycznego rozwiązania Eulera. Autorka przedstawia również wartości ugięcia w środku belki, w funkcji zmieniającego się obciążenia oraz wartości przemieszczenia poziomego jednej z podpór. Wartości przemieszczeń w funkcji zmieniającego się obciążenia zostały przedstawione na rysunkach 7.2 oraz 7.3.

Wyniki obliczeń Autorka uzyskała dla różnych dyskretyzacji i zestawiała je w tablicy 7.1. Autorka wykonała również analizę wpływu dwóch nieliniowych macierzy sztywności, na otrzymywane wyniki przemieszczeń. Otrzymane wyniki wskazują znaczący wpływ obu macierzy dla wzrastającej wartości obciążenia, co jest zgodnie z intuicją inżynierską.

W dalszym ciągu prezentowanych obliczeń Autorka zajmuje się analizą zadań związanych z wyznaczeniem wartości siły krytycznej (obciążenia krytycznego) w przypadku zewnętrznego obciążenia siłą skupioną Heaviside'a oraz siłą harmonicznym zmienną.

Na uwagę zasługuje przygotowanie przez Autorkę dysertacji oryginalnych, autorskich procedur obliczeniowych opracowanych w języku programowania C++. W dobie powszechnie stosowanych programów komercyjnych praca doktorantki związana z samodzielnym przygotowaniem algorytmów numerycznych budzi uznanie.

Elementem, na który warto zwrócić uwagę, jest wspomniany już wcześniej, zaproponowany przez Autorkę algorytm poszukiwania wartości obciążenia krytycznego przy pełnym, nieliniowym opisie procesu deformacji wraz uwzględnieniem odkształceń postaciowych.

Autorka wykonała obliczenia dla trzech sposobów realizacji obciążenia belki: statyczną siłą skupioną, działającą wzdłuż osi podłużnej układu współrzędnych (osi poziomej), siłą Heaviside'a oraz siłą harmonicznie zmienną, działającą wzdłuż osi podłużnej układu współrzędnych.

Autorka wykonała analizy przemieszczeń poprzecznych i podłużnych w odniesieniu do punktów charakterystycznych belki w zależności od wartości amplitudy siły skupionej, analizy okresów oraz częstości kołowych drgań poprzecznych i podłużnych w zależności od wartości amplitudy siły skupionej.

3.3. Główne elementy oryginalne przedstawione w dysertacji

W niniejszej dysertacji można wyróżnić następujące główne oryginalne elementy zaproponowane przez Autorkę

- Zastosowanie elementów skończonych elementów z uwzględnieniem pełnej nieliniowości geometrycznej w zaproponowanym modelu deformacji pręta,
- zdefiniowanie umownej wartości obciążenia krytycznego w zadaniu geometrycznie nieliniowym z imperfekcjami przy obciążeniu zmiennym w czasie,
- opracowanie autorskich algorytmów obliczeniowych i ich numeryczna aplikacja w środowisku programowania C++.

3.4. Uwagi, sugestie i pytania

Na zakończenie warto wskazać kilka elementów do dalszej dyskusji, ewentualnie do wykorzystania np. w przyszłych badaniach naukowych przez Autorkę niniejszej dysertacji.

1. Autorka założyła, że deformacja belki odbywa się wyłącznie w jednej płaszczyźnie, tymczasem natura zjawiska utraty stateczności jest bardziej złożona, o czym dobrze byłoby wspomnieć na samym początku dysertacji.
2. W opisie teoretycznym prezentowanego zadania dobrze byłoby poświęcić więcej miejsca na dyskusję związaną z funkcjami kształtu. Z uwagi na bardziej zaawansowany model numeryczny dobrze byłoby umiejscowić ją w części pracy poprzedzającej przykłady liczbowe. Autorka przedstawia ten opis dopiero w rozdziale poświęconym przykładom liczbowym. Nasuwa się pytanie, na ile np. funkcje kształtu wyższego rzędu zwiększą efektywność zaprezentowanej metody. Czy Autorka rozważała zastosowanie takich funkcji?
3. Autorka twierdzi, że minimalna liczba elementów skończonych koniecznych do uzyskania poprawnych wyników w analizie statycznej to około 50. Analiza wyników zbieżności rozwiązania ze względu na liczbę elementów skończonych przedstawiona w tabeli 7.1 prowadzi raczej do wniosku, że liczba ta powinna być jednak większa.

4. W celu pewnej weryfikacji wyników autorskich numerycznych, można porównać otrzymane rozwiązania z wynikami uzyskanymi dla pręta Eulera-Bernoulliego przy tej samej liczbie elementów skończonych.
5. Przykłady liczbowe ograniczyły się wyłącznie do analiz przeprowadzonych dla belki spoczywającej na podporze przegubowo-nieprzesuwnej oraz przegubowo-przesuwnej umieszczonych na obu jej końcach. Dobrze byłoby rozszerzyć analizy na pręty o różnorodnych warunkach brzegowych, w tym pręty o nieciągłych wewnętrznych warunkach przemieszczeniowych tzn. z łącznikami np. przegubowymi lub ślizgowymi (teleskopowymi).
6. W naturalny sposób można rozszerzyć prezentowane zadanie na analizę stateczności belek poddanych skupionemu obciążeniu niekonserwatywnemu, które przyłożone jest np. na końcu swobodnym wspornika lub obciążeniu stycznemu do osi pręta. Czy aparat obliczeniowy zaprezentowany przez Autorkę pozwala na takie analizy?
7. Innym naturalnym rozszerzeniem analiz zaprezentowanych przez Autorkę jest zadanie utraty stateczności konstrukcji rozumianej jako bardziej złożona konstrukcja, np. rama płaska lub przestrzenna.
8. Ciekawym rozszerzeniem (uogólnieniem) prezentowanego zadania byłaby analiza utraty stateczności belki obciążonej w sposób ciągły i styczny do jej osi w ujęciu metody elementów skończonych przy zastosowaniu funkcji kształtu wyższych rzędów.
9. Doktorantka przeprowadziła analizy dla teorii deformacji pręta umiarkowanie krępego (lub po prostu krępego), gdzie uwzględnia się deformacje wywołane obecnością siły poprzecznej (deformacje związane z odkształceniami postaciowymi). Teoria ta ma ograniczenia związane z samym pojęciem pręta krępego lub umiarkowanie krępego. Materiał takiego pręta, może wcześniej wyjść ze stanu sprężystego, tzn. wartość naprężeń normalnych (dominujących) może przekroczyć wartość naprężeń przy których następuje uplastycznienie przekroju. Możemy zatem powiedzieć, że znajdujemy się na pograniczu dwóch teorii i pręt jest jeszcze dostatecznie wiotki, tak aby nie doszło do uplastycznienia przekroju pręta przed rozdwojeniem ścieżki równowagi. Prosiłbym o krótki komentarz Autorki – czy rozważała również analizę w zakresie niesprężystym, np. zgodnie z teorią Engessera-Karmana lub Engessera-Shanleya.
10. W przedstawionych równaniach oraz w tekście rozprawy nie ma spójności w oznaczeniach wielkości zmiennych, np. w wyrażeniu (4.1) są one zapisane czcionką pochyłą, a już w pierwszym z wyrażen (4.14) czcionką prostą. Podobnie w oznaczeniach warunków brzegowych (4.16) występuje czcionka prosta. Podobne niespójności występują w innych równaniach (zależnościach) oraz np. w tekście na stronie 36 rozprawy. Nie umniejsza to w żaden sposób merytorycznej treści niniejszej dysertacji.
11. W przypadku uwzględnienia w procesie deformacji wpływu odkształceń postaciowych można wykonać analizę porównawczą, związaną z wpływem obrotowych stopni swobody i związanych z nimi sił bezwładności na otrzymane rozwiązanie.



12. Wyjaśnienia wymaga sposób obliczania całek obecnych w równaniu pracy wirtualnej (przygotowanej). Czy Autorka obliczała je w sposób numeryczny? Jeśli tak, to za pomocą jakiej metody?
13. Z uwagi na w pełni nieliniowy opis deformacji, możemy rozważyć belkę, która spoczywa na dwóch podporach o zablokowanych przemieszczeniach poziomych (np. podporach przegubowo-nieprzesuwnych). Jak wówczas przebiegałby proces obliczenia częstości kołowych drgań własnych? Prosiłbym o krótki komentarz.
14. Wnioski końcowe przedstawione przez Autorkę wydają się być zbyt ogólne. Dobrze byłoby uwypuklić największy fakt wykonania analiz numerycznych zgodnie z pełni nieliniowym modelem deformacji i przy współdziałaniu w tym procesie odkształceń postaciowych.

4. Wnioski końcowe i podsumowanie

Tematyka naukowa podjęta przez mgr inż. Izabelę Kasprzyk, której rezultatem jest niniejsza dysertacja, stanowi ciekawy i wciąż interesujący element dociekań, który należy do gałęzi mechaniki związanej z inżynierską analizą stateczności konstrukcji.

Wskaźniki bibliometryczne Doktorantki są następujące:

- baza Scopus: index Hirscha $H = 2$ oraz 6 cytowań, gdzie rozpoznano publikacje Doktorantki,
- baza Research Gate: index Hirscha $H = 2$ oraz 8 cytowań, gdzie rozpoznano publikacje Doktorantki,
- Doktorantka jest autorką i współautorką 28 publikacji, w skład których wchodzi streszczenia referatów konferencyjnych, rozdziały w monografii oraz publikacje w czasopismach naukowych, w tym dwa artykuły o liczbie 100 i 140 punktów ministerialnych. Część niniejszych prac jest powiązana z dociekaniem naukowymi Doktorantki, które zostały przedstawione w niniejszej dysertacji, co wyczerpuje wymagania związane z działalnością publikacyjną związaną ze studiami naukowymi prowadzonymi nad wybranym tematem badawczym.

Dysertacja przygotowana została w formie książkowej czytelnie i zrozumiały dla odbiorcy. Autorka nie ustrzegła się jednak pewnych błędów edytorskich, które nie zmniejszają w sposób znaczący przekazu naukowego. Zaleca się jednak, w przypadku kontynuacji pracy nad podjętą już tematyką zwrócić uwagi na wspomniane elementy. Dobór literatury cytowanej można uznać za właściwy.

Temat rozważań naukowych podjęty przez Autorkę pozostaje wciąż aktualny. Warto ten temat rozszerzyć o analizy związane ze zjawiskiem utraty stateczności całej konstrukcji, a nie tylko pojedynczego jej elementu – belki.

Stwierdzam również, że cel dysertacji został przez jej Autorkę w pełni osiągnięty, a sformułowane tezy udowodnione, oraz że wkład Autorki niniejszej dysertacji w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Lądowa Geodezja i Transport w obszarze mechaniki jest widoczny.

Uwagi krytyczne i pytania zawarte w niniejszej opinii mają charakter dociekań naukowych i nie obniżają wartości naukowej opiniowanej dysertacji.

GŁÓWNY WNIOSEK KOŃCOWY

Przedstawione w dysertacji zagadnienia wyczerpują wszystkie kryteria stanowiące podstawę do ubiegania się przez mgr inż. Izabelę Kasprzyk o stopień naukowy doktora nauk technicznych w myśl Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.).

Wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa Geodezja i Transport Politechniki Bydgoskiej o przyjęcie niniejszej dysertacji doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

WNIOSEK DODATKOWY

Biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy przedstawionych zagadnień oraz wysoką samodzielność, związaną z opracowaniem i numeryczną aplikacją autorskich algorytmów obliczeniowych **wniosuję o wyróżnienie niniejszej dysertacji doktorskiej.**

Michał Guminiak