

Dr hab. inż. Artur Krowiak, prof. PK
Katedra Informatyki Stosowanej,
Wydz. Mechaniczny Politechniki Krakowskiej,
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

Kraków 09.07.2021

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Ilony Cieślińskiej-Gąsior
„Stateczność i drgania swobodne wstępnie sprężonej kolumny geometrycznie nieliniowej
spoczywającej miejscowo na podłożu Winklera poddanej obciążeniu swoistemu”

Recenzja została opracowana na podstawie pisma dr hab. inż. Janusza Szmidli, prof. PCz, Kierownika Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, pismo R-WIMiL-510-7/14 z dnia 28.05.2021, informujące o powołaniu na recenzenta w.w. rozprawy, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna z dnia 29 kwietnia 2021.

1. Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny praca obejmuje 143 strony, podzielona jest na 11 rozdziałów, w tym spis literatury, ponadto zawiera spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis najważniejszych oznaczeń. W pracy zamieszczono 67 rysunków.

W krótkim wstępie (rozdział 1) wymieniono rodzaje obciążeń, którym poddane mogą być układy smukłe badane pod kątem utraty stateczności oraz wymieniono parametry fizyczne i geometryczne mające wpływ na stateczność takich układów. Na końcu rozdziału sprecyzowano czego dotyczyć będzie praca doktorska.

Rozdział 2 to obszerny przegląd literatury, w którym wyodrębniono cztery części:

- pierwszą, dotyczącą klasyfikacji obciążeń układów smukłych,
- drugą, przybliżającą zagadnienia stateczności i drgań układów geometrycznie nieliniowych przy różnych rodzajach obciążeń,
- trzecią, omawiającą znane w literaturze przedmiotu zjawisko lokalnej i globalnej utraty prostoliniowej postaci równowagi,
- czwartą, przedstawiającą prace, gdzie badano wpływ wybranych czynników, takich jak: podłoże typu Winklera, wstępne sprężenie, na stateczność i drgania układów smukłych.

W rozdziale 3 przedstawiono cel i zakres pracy oraz nakreślono zadania, których realizacja pozwoli na osiągnięcie zamierzonego celu pracy. W rozdziale tym przedstawiono również podstawowe założenia jakie stosuje się w pracy przy opisie analizowanych układów.

Rozdział 4 przedstawia modele fizyczne analizowanych kolumn, w szczególności model kolumny geometrycznie nieliniowej spoczywającej miejscowo na podłożu sprężystym, obciążonej siłą śledzącą skierowaną do bieguna dodatniego.

W rozdziale 5, posługując się zasadą Hamiltona, wyprowadzono model matematyczny takiej kolumny, a także użyto metodę małego parametru i rozdzielenia zmiennych w odniesieniu do otrzymanego układu równań.

To pozwoliło w rozdziale 6 na zapisanie analitycznych rozwiązań, ograniczając się do zerowej (kryterium statyczne) i pierwszej (kryterium kinetyczne) potęg małego parametru. W rozdziale tym wyprowadzono również zależność różniczkowo-całkową pozwalającą określić monotoniczność funkcji częstości drgań układu od parametru obciążenia.

Rozdział 7 i 8 prezentuje wyniki obliczeń numerycznych dotyczących wpływu wybranych parametrów, w szczególności parametrów miejscowego podłoża Winklera oraz wstępnego sprężenia, na zjawisko lokalnej i globalnej utraty prostoliniowej postaci równowagi statycznej oraz na częstość drgań swobodnych układu. Analizuje się wpływ wymienionych parametrów pod kątem „wyjścia” układu z zakresu lokalnej utraty prostoliniowej postaci równowagi.

W rozdziale 9 wyznaczono postacie drgań własnych kolumny nieliniowej, miejscowo posadowionej na podłożu sprężystym przy różnych wartościach obciążenia siłą śledzącą skierowaną do bieguna dodatniego oraz dokonano klasyfikacji rozważanego układu na podstawie zależności $\Omega = \Omega(\lambda)$.

Rozdział 10 jest podsumowaniem pracy, w którym znalazły się wnioski z przeprowadzonych badań.

Pracę kończy spis literatury, w którym uwzględniono 173 pozycje, w tym 8 pozycji współautorskich doktorantki.

2. Ocena pracy

Ocena celowości podjęcia tematu

Omawiane w pracy układy mogą pełnić rolę rzeczywistych elementów konstrukcyjnych. Badanie takich układów pod kątem utraty stateczności oraz określenie zależności częstości drgań swobodnych od wartości obciążenia jest więc podstawowym elementem analizy mechanicznej tych konstrukcji.

W pracy skupiono się na teoretycznych i numerycznych badaniach dotyczących wpływu parametrów podłoża sprężystego oraz wstępnego sprężenia prętów układu, a także parametru charakteryzującego wielkość kolumny obciążającej, na wartość obciążenia bifurkacyjnego i częstość drgań swobodnych układu. Odpowiedni dobór tych parametrów może znacząco podnieść wartość obciążenia bifurkacyjnego i zminimalizować lub całkowicie wyeliminować niekorzystny efekt lokalnej utraty

prostoliniowej postaci równowagi statycznej. Znajomość badanych w pracy zależności ma bardzo istotne znaczenia nie tylko poznawcze, ale i utylitarne, przy projektowaniu takich konstrukcji. Dlatego podjęcie tej tematyki uważam za uzasadnione.

Ocena sformułowania tytułu pracy

Tytuł pracy jest adekwatny do jej zawartości. Co prawda w pracy rozważa się tylko jeden z przypadków obciążenia swoistego, ale uszczegółowienie tego w tytule pracy wydłużyłoby i tak już dość długi tytuł.

Ocena zawartości pracy

Do zrealizowania celu pracy konieczne było wyprowadzenie modelu matematycznego oraz jego rozwiązanie, co w przypadku rozważanych w pracy układów jest zagadnieniem trudnym i złożonym. W tych aspektach posłużono się metodyką przez lata rozwijaną w Katedrze Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Częstochowskiej przy badaniu tego typu układów.

Różnica pomiędzy głównym układem rozważanym w pracy, a innymi, podobnymi, znanymi już wcześniej w literaturze tkwi w tym, że podłoże sprężyste jest rozważane w pewnym przedziale środkowego pręta (miejscowe podłoże typu Winklera), a nie na całej jego długości. Długość tego przedziału oraz jego umiejscowienie są podstawowymi parametrami, obok sztywności podłoża, których wpływ na wartość obciążenia bifurkacyjnego oraz na częstość drgań swobodnych bada się w pracy.

Do oryginalnych elementów pracy należy zaliczyć:

- Zaadaptowanie znanej metodyki badania tego typu układów do analizy układu miejscowo spoczywającego na podłożu Winklera, w tym wykorzystanie zasady Hamiltona do wyprowadzenia modelu matematycznego oraz metody małego parametru i techniki rozdzielania zmiennych do otrzymania rozwiązań nieliniowych równań ruchu.
- Numeryczne wyznaczenie zależności pokazujących wpływ parametrów układu, w szczególności parametrów miejscowego podłoża Winklera i wstępnego sprzężenia, na wartość obciążenia bifurkacyjnego oraz na częstość drgań swobodnych.
- Wykazanie możliwości podniesienia wartości obciążenia bifurkacyjnego oraz możliwości „wyjścia” z zakresu lokalnej utraty prostoliniowej postaci równowagi przez odpowiedni dobór parametrów miejscowego podłoża sprężystego i wstępnego sprzężenia.

- Wyznaczenie krzywych zmian częstości drgań własnych oraz postaci drgań w zależności od obciążenia.

Ogólne uwagi krytyczne i dyskusyjne:

- 1) Po przeczytaniu „Przeglądu literatury” można odnieść wrażenie, że wszystko lub prawie wszystko co obejmuje praca doktorska już zostało zrobione. Wynika to z faktu, że Autorka w tej części odwołuje się także do swoich współautorskich publikacji, które pokazują wyniki badań objętych pracą.

Lepszym sposobem przedstawienia stanu zagadnienia jest pokazanie tego co jest zrobione do tej pory bez wkładu własnej pracy, w tym przypadku doktorskiej. W ten sposób można przejrzysto uzasadnić tematykę podjętą w pracy, określić cel pracy, zakres i ewentualnie tezę. A dopiero w dalszych rozdziałach odwoływać się do swoich prac, publikujących odpowiednie wyniki.

- 2) W rozdziale 6 przedstawiono rozwiązania równań przy zerowej i pierwszej potędze małego parametru. Nie przedstawiono jednak dalszego toku postępowania prowadzącego do wyznaczenia obciążenia bifurkacyjnego lub zależności częstości drgań od obciążenia. W rozdziale 7 zilustrowano wyniki badań numerycznych lakonicznie stwierdzając, że bazują one na rozwiązaniu zagadnienia brzegowego z rozdziału 6.

Brakuje precyzyjnego wskazania z jakiej konkretnie zależności wyznaczane są te numeryczne charakterystyki i skąd ta zależność się bierze.

- 3) W pracy kilkakrotnie wspomina się o opracowaniu algorytmów numerycznych pozwalających na uzyskanie zależności zilustrowanych w rozdziałach 7, 8, 9 (np. str. 99, 2 akapit). Ani razu jednak nie omówiono tych algorytmów, ani nie sprecyzowano do rozwiązania jakiego konkretnie zadania posłużyły.

Mam wrażenie, że te algorytmy wiążą się z zależnością, o której wspominam w pkt. 2), a która nie jest jasno opisana w pracy.

- 4) Co leży u podstaw sformułowania funkcjonału (6.42). Funkcjonał ten jest punktem wyjścia do otrzymania związku (6.62), pozwalającego określić monotoniczność funkcji $\Omega = \Omega(\lambda)$, a tym samym zaklasyfikować układ do jednego z typów np. dywergencyjnego czy dywergencyjnego-pseudoflatterowego.

Czy cały ten tok postępowania opisany wzorami (6.42)-(6.62) jest konieczny skoro klasyfikacji tej można dokonać na podstawie krzywych $\Omega = \Omega(\lambda)$ otrzymanywanych numerycznie w pracy?

- 5) Praca zawiera wyniki badań numerycznych. Podjęcie próby eksperymentalnej weryfikacji otrzymanych wyników podniosłoby znacząco wartość pracy.

Szczegółowe uwagi głównie natury edytorskiej:

- a) Nazwy kilku rozdziałów mogą wprowadzać pewien chaos.
Nazwy rozdziałów 6 i 7 mogą sugerować, że chodzi tu o trochę inne układy, a są to de facto te same układy, więc ich nazewnictwo w tytule rozdziałów powinno być identyczne. Podobnie nazwy rozdziałów 7 i 8 sugerują, że w rozdziale 8 rozważa się układ różniący się od tego z rozdziału 7 nie tylko wstępnym sprężeniem, ale również obciążeniem siłą śledzącą skierowaną do bieguna dodatniego. A przecież w całej pracy analizuje się układ poddany takiemu obciążeniu.
- b) W spisie treści rozdziały: „Wnioski i uwagi końcowe” oraz „Literatura” mają numerację, a w dalszej części pracy rozdziały te są bez numerów.
- c) Str. 7: Jest $(pA)_i$, powinno być $(\rho A)_i$.
- d) Na rys. 2.4a kąty α , ϑ są błędnie pokazane jako identyczne.
- e) W liczniku prawej strony równania (2.7) powinno być $(EJ)_i$.
- f) Str. 46: Jak wskazano, $NW_NP(\mu, R^*, K^*, l_c^*, l_d^*, -)$ oznacza kolumnę częściowo (nie miejscowo) spoczywającą na podłożu Winklera. A skoro tak, to nie powinna zależeć od parametrów l_c^* i l_d^* , charakteryzujących miejscowe podłoże Winklera. Podobnie w przypadku $L3W_C P$ i $L3W_C P$.
- g) We wzorach (5.1), (5.2), (5.6) wielkości $(EJ)_i$, $(EA)_i$ oraz $(\rho A)_i$ zależą od zmiennej sumacyjnej „ i ” więc muszą być objęte operatorem sumowania, a są wyciągnięte przed sumę. We wzorze (5.3) pochodna W_1 powinna być liczona w punkcie $x_1 = l_1$, a we wzorze (5.4) funkcja podcałkowa powinna być w potędze drugiej.
Niektóre z tych błędów mają swoje konsekwencje w następnych wzorach, wykorzystujących zasadę Hamiltona do wyprowadzenia modelu matematycznego.
Zapis wyprowadzonych równań ruchu jest prawidłowy, co wskazuje, że błędy te mają charakter czysto edytorski.

- h) W rów. (5.23) jest $S_j(t) \frac{\partial^2 W_j(x_j, t)}{\partial x_j^4}$, a powinno być $S_j(t) \frac{\partial^2 W_j(x_j, t)}{\partial x_j^2}$.
- i) W rów. (5.78)-(5.82) rozwija się nieliniowe wielkości zawarte w bezwymiarowych równaniach ruchu w szereg względem potęg małego parametru. Dlaczego więc bierze się również pod uwagę wymiarową częstość drgań ω w tych rozwinięciach (rów. (5.82))? Podobnie w rów. (5.116).
- j) Str. 55, ostatnia linijka: „... i równań przemieszczeń wzdłużnych (5.68), ...”. Powinno być (5.58).
- k) Jest pewna niekonsekwencja w oznaczaniu bezwymiarowej sztywności podłoża. Spis oznaczeń sugeruje, że w tym celu używać się będzie K^* , w równaniach (5.43-5.46) wprowadza się oznaczenie K_1 jako bezwymiarowy parametr sztywności podłoża, a na rys. 6.1 widnieje K_1^* .
- l) Niedokończony podpis pod rys. 6.2.
- m) Str. 66, 2 akapit: „... kąt styczny do krzywej ...”. Powinno być „... kąt stycznej do krzywej ...”
- n) Str. 66, ostatnia linijka: „... równania ruchu (6.17-6.18) ... „
Przytoczone numery nie oznaczają równań ruchu.
- o) W rozdziale 6.3, w równaniach (6.37 – 6.41) wprowadzono niespodziewanie wstępne sprężenie, chociaż tytuły rozdziałów sugerują, że dopiero w rozdziale 8 to zjawisko będzie brane pod uwagę.
- p) Po lewej stronie rów. (6.45) powinno być $\frac{dF}{d\lambda_1}$ zamiast $\frac{dF}{dS_0^*}$.
- q) Str. 74, 1 akapit: „Przekształcając równanie (9.24) ...”. Błędne odwołanie się do równania. Podobnie w ostatniej linijce tej strony, zamiast (9.62) powinno być (6.62).
- r) Str. 91, ostatni akapit: „... (krzywe ciągłe).” Powinno być „... (krzywe przerywane).”
- s) Na rys. 7.29 na str. 100 błędnie oznaczono pierwszą częstość drgań kolumny L2P.

Ponadto rysunek ten powinien mieć numer 7.30.

Błędy w numeracji rysunków pojawiają się jeszcze w kilku innych miejscach w rozdziale 8.

- t) Str. 107: Na początku rozdziału 8.1 zawarta jest informacja, że w rozdziale tym analizowana będzie m.in. kolumna NW_{MS} , a wyniki odniesione zostaną do m.in. kolumny oznaczonej jako NS , co sugerowałoby, w kontekście wcześniej wprowadzonych oznaczeń, że są to kolumny wstępnie sprzężone, nieobciążone siłą śledzącą P . Czy rzeczywiście w rozdziale tym brano pod uwagę takie układy?
- u) Str. 121: „... opisanych zależnościami (6.23, 6.24, 6.27, 6.30).” W tym miejscu jest błędne odniesienie do (6.23), a brakuje odniesienia do wzoru (6.33).

3. Podsumowanie

Tematyka ocenianej pracy mieści się w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna. Praca obejmuje ważne zagadnienie, mające znaczenie nie tylko poznawcze, ale również praktyczne. Metodyka przyjęta do rozwiązania postawionego problemu jest prawidłowa. Praca zawiera sporo, moim zdaniem wartościowych wyników. Autorka wykazała się umiejętnością modelowania i badania nieliniowych układów mechanicznych pod kątem stateczności i drgań własnych. Dlatego, mimo wielu usterek głównie edytorskich i kilku uwag, pracę oceniam pozytywnie.

Uważam, że praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003 r. i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Ilony Cieślińskiej-Gąsior do publicznej obrony.

