

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Garus

pt.: Stateczność dynamiczna tłumionych układów mechanicznych na przykładzie układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego

1. Uwagi wstępne

Recenzję wykonano na prośbę Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej zgodnie z otrzymanym pismem od Prodziekana ds. nauki Wydziału Inżynierii Mechanicznej dr hab. inż. Janusza Szmidli, prof. PCz z dnia 23 maja 2025 roku. Do pisma został dołączony egzemplarz rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Garus.

Recenzowana rozprawa obejmuje 107 stron, zawiera streszczenia w języku polskim oraz angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń oraz 5 rozdziałów. Następnie znajduje się spis literatury obejmujący 197 pozycji. Na końcu zawarto spis rysunków, tabel oraz dodatek zawierający elementy macierzy współczynników.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Wojciech Sochacki, prof. PCz.

2. Ocena doboru tematu rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy modelowania i analizy stateczności dynamicznej układu mechanicznego na przykładzie zmiany wysięgu żurawia samochodowego z uwzględnieniem wpływu różnego rodzaju tłumienia drgań na jego stateczność dynamiczną. Stateczność dynamiczna konstrukcji mechanicznych jest kluczowym zagadnieniem, które powinno być uwzględniane podczas procesu projektowania oraz w trakcie okresu eksploatacji. Dotychczas powstało wiele prac związanych z tą tematyką zawierających opracowania charakteryzujące się różnym stopniem przybliżenia i uproszczenia. Niemniej jednak rozwijanie tej wiedzy

w odniesieniu do nowych konstrukcji, modyfikacji i ulepszania już istniejących jest kluczowe dla efektywnego rozwoju. Badanie zachowania się konstrukcji w kierunku możliwości wystąpienia rezonansu parametrycznego jest istotne, w szczególności uwzględnienie

w modelowaniu różnego typu tłumienia: zewnętrznego, wewnętrznego oraz konstrukcyjnego. Ponieważ jedynie tak doprecyzowane modele są w stanie w wystarczająco przybliżony sposób oddać realne zachowanie się konstrukcji.

Identyfikacja tych zjawisk i świadome korzystanie

z tej wiedzy prowadzi do powstania konstrukcji lepszych, szczególnie jeśli bierzemy pod uwagę tak złożone maszyny jak żuraw samochodowy.

W mojej ocenie Doktoranta podjęła się aktualnej tematyki oraz zadania, którego efektem między innymi mają być wytyczne wspomagające proces projektowania konstrukcji. Uwzględnienie w modelu zjawiska tłumienia różnego typu prowadzi do uzyskania lepszych wyników. Przedstawiony w dysertacji proces modelowania na przykładzie prostej belki Bernoulliego-Eulera oraz na złożonej konstrukcji, na przykładzie układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego DST0285 może być potraktowany jako zbiór wytycznych w procesie modelowania i analizy stateczności dynamicznej innych konstrukcji mechanicznych. Moim zdaniem poruszana przez Doktorantkę w dysertacji tematyka jednoznacznie wchodzi w zakres dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Zasadnicza część rozprawy zawarta jest w pięciu rozdziałach. Treści zawarte w tych rozdziałach związane są z tematem rozprawy oraz ze zdefiniowanymi celami i zadaniami badawczymi.

W **rozdziale pierwszym** Doktorantka przedstawiła analizę stanu wiedzy. W szczególności skupiła się na metodach analizy układów wzbudzanych parametrycznie. Przedstawiła prace opisujące zagadnienia związane z dynamiką belek Bernoulliego-Eulera i ich statecznością dynamiczną. Wymieniła i scharakteryzowała typy tłumienia, które występują w maszynach: konstrukcyjne w połączeniach ruchomych i nieruchomych, wewnętrzne oraz zewnętrzne.

Zaprezentowała szereg prac opisujących różne podejścia w modelowaniu zjawisk tłumienia. Następnie Doktorantka przedstawiła prace i stan wiedzy związany z

dynamiką układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego skupiając się na wybranych elementach i zespołach konstrukcyjnych.

W **rozdziale drugim** Doktorantka zaprezentowała cel oraz zakres pracy. Celem głównym było modelowanie i analiza stateczności dynamicznej układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego z uwzględnieniem wpływu różnego rodzaju tłumienia drgań na jego stateczność dynamiczną. Doktorantka postawiła też tezę, która głosi, że uwzględnienie tłumienia drgań w układzie zmiany wysięgu żurawia samochodowego nie eliminuje możliwości utraty stateczności dynamicznej układu.

Doktorantka podzieliła całość prac na etapy, wśród których można wyróżnić:

- przedstawienie metodyki badań zastosowanej w pracy poprzez wykonanie badania drgań i stateczności dynamicznej prostej belki Bernoulliego-Eulera,
- modelowanie układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego, w którym uwzględniono tłumienie drgań,
- sformułowanie i rozwiązanie zagadnienia drgań i stateczności dynamicznej układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego, w którym uwzględniono tłumienie drgań.

Doktorantka zadeklarowała, że rozwiązania zagadnień drgań i stateczności dynamicznej analizowanych układów zrealizowała z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania i programu Mathematica.

Rozdział trzeci zawiera metodykę badań na przykładzie prostej belki Bernoulliego-Eulera. Doktorantka sformułowała i rozwiązała zagadnienie brzegowe, określiła warunek ortogonalności funkcji własnych, sformułowała zagadnienie stateczności dynamicznej oraz wyznaczyła krzywe przejścia dla pierwszego obszaru niestatecznego metodą perturbacyjną. W drugiej części rozdziału Doktorantka przedstawiła przykładowe wyniki badań stateczności dynamicznej prostej belki ze szczególnym uwzględnieniem badania wpływu rodzaju materiału na stateczność dynamiczną belki bez uwzględnienia tłumienia (analizie poddano cztery rodzaje materiału: stal, miedź, aluminium oraz tytan) oraz badanie wpływu tłumienia na stateczność dynamiczną belki Bernoulliego-Eulera. Doktorantka zdefiniowała bezwymiarowe współczynniki tłumienia: wewnętrznego, zewnętrznego i konstrukcyjnego oraz zaprezentowała pięć przypadków rozwiązań dla różnych kombinacji uwzględnionych przypadków tłumienia.

W podsumowaniu rozdziału Doktorantka doszła do wniosku, że uwzględnienie

tłumienia konstrukcyjnego w podporach belki zwiększyło stateczność dynamiczną układu, natomiast tłumienie ośrodka zmniejszyło obszar niestateczny i spowodowało, że układ w całym analizowanym zakresie δ miał rozwiązania stateczne. Tłumienie wewnętrzne nie spowodowało znaczących zmian stateczności w stosunku do układu nietłumionego. Jednoczesne uwzględnienie tłumienia ośrodka i podpór znacząco wpłynęło na stateczność dynamiczną analizowanego przypadku przenosząc rozwiązania w obszar rozwiązań statecznych w całym badanym zakresie.

W **rozdziale czwartym** Doktorantka przedstawia sformułowanie i rozwiązanie zagadnienia brzegowego dla układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego z uwzględnieniem tłumienia. Dokładnie opisuje przedmiot badań, jego parametry oraz założenia do modelu. Podobnie jak miało to miejsce z prostą belką Bernoulliego-Eulera, tutaj również został określony warunek ortogonalności funkcji własnych oraz sformułowanie zagadnienia stateczności dynamicznej dla układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego. W dalszej części Doktorantka przedstawiła parametry stosowane w modelu: geometryczne i fizyczne, dokonała wyznaczenia sztywności zastępczej trójczłonowego wysięgnika teleskopowego oraz wyznaczenia masy zastępczej układu. Przedstawiła model cieczy wypełniającej cylinder oraz w jaki sposób został zamodelowany układ liniowy. W dalszych podrozdziałach zostały przedstawione wyniki wpływu geometrii i obciążenia na częstotliwości własne układu nietłumionego oraz wyniki wpływu tłumienia na wartości własne układu. Następnie Doktorantka zaprezentowała wyniki wpływu tłumienia na stateczność dynamiczną układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego.

Do najważniejszych wniosków, do których doszła Doktorantka można zaliczyć te, które sprecyzowała na podstawie wyników badań wartości parametru ϵ dla pierwszego obszaru niestatecznego ($\delta = 0,25$) przy trzech różnych rodzajach tłumienia. I tak:

- wzrost wartości współczynnika tłumienia zewnętrznego N_S powodował nieznaczne zwiększenie stateczności układu poprzez zmniejszenie wartości parametru ϵ , jednocześnie następowało zwiększenie wartości minimum obszaru niestatecznego $\epsilon_{\min}$, układ stał się stateczny dla współczynnika tłumienia zewnętrznego równego $N_S = 6,15$,
- tłumienie wewnętrzne H_S nie wpłynęło znacząco na stateczność układu,

- tłumienie konstrukcyjne M_S obniżało wartość parametru ϵ , lecz nie eliminowało możliwości wystąpienia zjawiska rezonansu parametrycznego, ponieważ nie zmniejszało zakresu obszarów niestatecznych,
- uwzględnienie trzech rodzajów tłumienia bardziej stabilizowało układ. Stawał się on stateczny dla wartości tłumienia zewnętrznego $N_S = 3,94$ oraz tłumienia konstrukcyjnego $M_S = 1,23 \cdot 10^{-2}$. Każde dalsze zwiększanie tłumień powodowało, że rozwiązania stateczności dynamicznej układu były stateczne.

Rozdział piąty zawiera wnioski i uwagi końcowe. Doktorantka zadeklarowała osiągnięcie głównego celu naukowego, którym było modelowanie i analiza stateczności dynamicznej układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego z uwzględnieniem wpływu różnego rodzaju tłumienia drgań na jego stateczność dynamiczną. Potwierdziła wykonanie zadań związanych z trzema zaplanowanymi etapami badawczymi oraz sformułowała wnioski końcowe:

- uwzględnienie w modelu stateczności dynamicznej prostego układu w postaci belki jak i układu zmiany wysięgu żurawia tłumienia konstrukcyjnego, zwiększało stateczność takich układów, jednak nie eliminowało możliwości wystąpienia rezonansu parametrycznego,
- uwzględnienie w badanych układach tłumienia ośrodka zmniejszało obszary rozwiązań niestatecznych,
- zwiększanie wartości współczynnika tłumienia zewnętrznego powyżej określonej wartości granicznej powoduje, że układy w całym analizowanym zakresie będą miały rozwiązania stateczne,
- tłumienie wewnętrzne dla rzeczywistych wartości współczynnika tłumienia wewnętrznego stali nie wprowadzało znaczących zmian stateczności dynamicznej w stosunku do układów nietłumionych,
- jednoczesne uwzględnienie wszystkich analizowanych rodzajów tłumienia znacząco wpłynęło na możliwość uzyskania rozwiązań statecznych badanych układów.

Literatura zawiera 197 pozycji publikacyjnych oraz internetowych. Znajdują się tutaj prace starsze będące opracowaniami podstawowymi w przedmiotowej tematyce jak i aktualne związane z obecnie realizowanymi pracami związanymi z rozwijaną przez Doktorantkę tematyką.

4. Ocena rozprawy

W mojej ocenie Doktorantka podjęła się rozwiązania szeregu aktualnych problemów badawczych związanych z modelowaniem i analizą stateczności dynamicznej układu mechanicznego na przykładzie zmiany wysięgu żurawia samochodowego z uwzględnieniem wpływu różnego rodzaju tłumienia drgań na jego stateczność dynamiczną

Za wkład Doktorantki w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna należy uznać:

- przedstawienie metodyki badań zastosowanej w pracy poprzez wykonanie badania drgań

i stateczności dynamicznej prostej belki Bernoulliego-Eulera, w której uwzględniono tłumienie drgań,

- zamodelowanie układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego, w którym uwzględniono tłumienie drgań, a wraz z tym: wyznaczanie sztywności zastępczej trójczłonowego wysięgnika teleskopowego, wyznaczanie masy zastępczej układu oraz określenie sztywności zastępczej cieczy wypełniającej cylinder siłownika,
- sformułowanie i rozwiązanie zagadnienia drgań i stateczności dynamicznej układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego, w którym uwzględniono tłumienie drgań, a w szczególności: sformułowanie zagadnienia drgań poprzecznych w płaszczyźnie podnoszenia wysięgnika, rozwiązanie zagadnienia drgań układu i określenie jego funkcji własnych, określenie warunków ortogonalności funkcji własnych, określenie zakresów długości olinowania, przy określonych pozostałych parametrach geometrycznych i fizycznych modelu, dla których otrzymano rozwiązania stateczne, zbadanie wpływu pozostałych parametrów geometrycznych i obciążenia na stateczność dynamiczną badanego układu oraz analizę wpływu rozważanych w pracy rodzajów tłumienia na stateczność dynamiczną układu.

Doktorantka wykonała wieloparametryczną ocenę wpływu tłumienia wewnętrznego, zewnętrznego oraz konstrukcyjnego na stateczność dynamiczną wybranej konstrukcji oraz potencjalną możliwość wystąpienia rezonansu parametrycznego. Najistotniejsze moim zdaniem są wyniki i płynące z tych wyników wnioski dotyczące możliwości zwiększenia obszarów rozwiązań statecznych poprzez uwzględnienie zjawiska tłumienia różnego typu. Wyniki te mogą być pomocne podczas przewidywania i poszerzania stateczności dynamicznej nowoprojektowanych konstrukcji.

5. Uwagi, komentarze

Moim zdaniem struktura pracy jest właściwa, poszczególne rozdziały w ukierunkowany sposób wprowadzają czytelnika w tematykę od przeglądu stanu wiedzy, przez opis poszczególnych zadań badawczych wraz z opisem otrzymanych wyników i wyciągniętych wniosków. Niemniej jednak moim zdaniem rozdział pierwszy zbyt płytko uwypukla istotę problemu. Owszem znajduje się tutaj dość szczegółowy opis stanu wiedzy z zakresu: metod analizy układów wzbudzanych parametrycznie, dynamiki belek Bernoulliego-Eulera i ich stateczności dynamicznej, typów tłumienia występujących w maszynach, tłumienia konstrukcyjnego, wewnętrznego i zewnętrznego oraz dynamiki układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego, ale moim zdaniem brakuje jednoznacznego wskazania braków wiedzy w tych obszarach tematycznych i opisanie ich w kontekście uzupełnienia tych braków przez realizowane w dysertacji badania. Na stronie 9 znajduje się tekst: „W niniejszej dysertacji analizowany jest wpływ różnych rodzajów tłumienia na stateczność dynamiczną układów mechanicznych na przykładzie układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego. Przedstawiony model oraz uzyskane na jego podstawie wyniki stanowią oryginalny wkład do aktualnych badań nad dynamiką układów tłumionych.” Na pierwszej stronie rozdziału dotyczącego analizy stanu wiedzy Doktorantka deklaruje co stanowi oryginalny wkład w rozwój prac nad dynamiką układów tłumionych. Moim zdaniem z analizy stanu wiedzy powinny wynikać braki w aktualnej wiedzy w tej tematyce, chęć uzupełnienia wiedzy i badań powinna być zrealizowana w odpowiedzi na wcześniej zdefiniowane niedostatki. Następnie zdefiniowanie celów pracy i zadań badawczych i w konsekwencji opis tych prac wraz z wynikami i wnioskami.

Zaproponowana przez Doktorantkę teza moim zdaniem jest zbyt oczywista. Warto byłoby tutaj doprecyzować, które rodzaje tłumienia mają istotny wpływ, albo w jakim zakresie uszczegółowienie i uzupełnienie modeli o różne rodzaje tłumienia dają powiększone obszary rozwiązań statecznych.

W rozdziale 3 pewien niedosyt pojawia się podczas analizy wyników badań. Moim zdaniem brakuje głębszej analizy i uzasadnienia zastosowanych parametrów.

Zarówno odnośnie wyboru jako przykładu do analiz belki o określonych właściwościach geometrycznych jak i parametrów związanych z zastosowanymi zakresami wartości współczynników dotyczących

uwzględnianych w modelach rodzajów tłumienia: wewnętrznym, zewnętrznym

i konstrukcyjnym. Podobnie rzecz dotyczy wyników z rozdziału 4 w odniesieniu do wartości zakresów współczynników związanych z różnymi rodzajami tłumienia. Tekst napisany jest starannie, niemniej jednak można znaleźć mniej lub bardziej wpływające na odbiór całokształtu pracy błędy redakcyjne i stylistyczne, oto niektóre z nich:

- „*Drgania mechaniczne są nierozzerwalnie związane praktycznie z każdym obszarem działalności człowieka.*” str. 9,

- „Przyjęte w pracy określenie tłumienie konstrukcyjne posiada charakter wiskotyczno-Coulombowski...”, str. 16,

Wskazane w powyższych uwagach niedoskonałości nie wpływają na wartość merytoryczną pracy, mają charakter dyskusyjny, niemniej jednak utrudniają w pewnym stopniu analizę i odbiór recenzowanej rozprawy.

6. Pytania szczegółowe

1. Na str. 37 pisze Pani: „Przyjęto długość belki równą $l = 3\text{ m}$ oraz kwadratowy przekrój poprzeczny o polu powierzchni $A = 0,09\text{ m}^2$. Przyjęto wartość krytycznej osiowej siły ściskającej dla belki wykonanej ze stali równą $P_c = 9,32676 \cdot 10^7\text{ N}$, stała składowa obciążenia wynosiła $P_0 = 5\%P_c$, podobnie zmienna składowa obciążenia wynosiła $S = 5\%P_c$.” Skąd akurat takie parametry geometryczne oraz założone wartości składowej stałej oraz zmiennej obciążenia?
2. Na str. 39 pisze Pani: „Do badania wpływu ośrodka na drgania układu przyjęte zostały bezwymiarowe wartości współczynnika tłumienia zewnętrznego w zakresie $0 < N < 1000$.” Jakim przykładowym ośrodkiem odpowiadają wartości skrajne?
3. Proszę szerzej rozwinąć sposób otrzymania optymalnej wartości bezwymiarowego współczynnika wiskotycznego tłumienia konstrukcyjnego w podporach przegubowych belki o wartości $M = 0,4$ (rozdział 3).
4. W tabeli 4.1 na str. 59 znajduje się E_c – moduł sprężystości postaciowej [Pa] o wartości $1,25 \cdot 10^9$. Jakiego elementu wykonanego z jakiego materiału ta wartość dotyczy?

5. Skąd przypadki oraz wartości bezwymiarowych współczynników tłumienia, które zostały zaprezentowane w tabeli 3.3? Dlaczego akurat takie?
6. Jakie wartości współczynników tłumienia konstrukcyjnego dla obu tłumików rotacyjnych C_{R1} i C_{R2} zostały przyjęte?
7. Jak oceniłaby Pani „rachunek zysków” z uwzględnienia w modelach różnych rodzajów tłumienia względem dokładności wyników związanych z poszerzeniem obszarów statecznych?
8. Jak oceniłaby Pani możliwości wykorzystania metody elementów skończonych podczas analogicznych analiz modeli, które uwzględniałyby wszystkie trzy rodzaje tłumienia, które Pani zaproponowała w swoich modelach?

7. Wniosek końcowy oceny rozprawy

Uważam, że tematyka poruszana w recenzowanej rozprawie doktorskiej wchodzi w zakres dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna. Biorąc pod uwagę wartość naukową rozprawy, zakres przeprowadzonych prac oraz to, że Doktorantka wykazała się umiejętnością rozwiązania oryginalnego problemu naukowego, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu realizowanej tematyki pracy stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. **Podsumowując, wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej o dopuszczenia mgr inż. Justyny Garus do dalszego postępowania kwalifikacyjnego przewidzianego w procedurze do uzyskania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.**