

Warszawa dn. 03.08.2025

dr hab. inż. prof. PW Marcin Bajkowski
Instytut Mechaniki i Poligrafii
Politechnika Warszawska
02-524 Warszawa
Ul. Narbutta 85

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgr inż. Justyny Garus

p.t.

„Stateczność dynamiczna tłumionych układów mechanicznych na przykładzie układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego”

1. Uwagi dotyczące tematu rozprawy, sformułowanego celu oraz zakresu pracy

Przedmiotem pracy są zagadnienia dotyczące modelowania, analizy oraz badań numerycznych drgań układu mechanicznego poddanego tłumieniu. Powyższe działania dotyczyły zmiany wysięgu żurawia samochodowego. Wykorzystując rzeczywistą konstrukcję żurawia samochodowego DST0285 opracowano i rozbudowano modele oparte o układ składający się z wysięgnika teleskopowego oraz siłownika hydraulicznego. W procedurze modelowania wykorzystano belkę Bernoulliego–Eulera oraz wybrane elementy dyskretne.

Naturalną kolejną rozwoju nauki jest ciągła dążność do poszukiwania nowych pomysłów badań konstrukcji nowobudowanych lub istniejących, uszczegółowienia modeli dynamicznych, a także do bardziej precyzyjnego opisu matematycznego ich właściwości.

Temat opiniowanej pracy prawidłowo wpisuje się nie tylko w aktualny trend poszukiwań naukowych i przełamywania barier poznawczych, które dotyczą badań podstawowych modeli dynamicznych, ale dodatkowo je uzupełniając, dobrze reprezentuje obszary działań badawczych i naukowych, których wykorzystanie może przyczynić się do rozszerzenia pola zainteresowań działań inżynierskich dotyczących wybranych zespołów konstrukcji dźwigowych, w szczególności tych montowanych i użytkowanych na podwoziach samojezdnych.

Po zapoznaniu się z całością pracy uważam, że sformułowanie tematu pracy z punktu widzenia naukowego jest prawidłowe i dobrze przemyślane, Na szczególne podkreślenie zasługuje to, że rozpatrywane, modelowane i analizowane są układy odzwierciedlone w rzeczywistych konstrukcjach dźwigowych. Fakt możliwości wykorzystania wyników prac w badaniach stosowanych i pracach rozwojowych mogących prowadzić do powstania nowych innowacyjnych rozwiązań (np. w zakresie podnoszenia parametrów cech funkcjonalnych konstrukcji dźwigowych, w zakresie ich stateczności i uniwersalności operacyjnej) jest kluczowy, w aspekcie wydźwignięcia gospodarczego rezultatów pracy.

Zamieszczona na początku drugiego rozdziału teza pracy mówiąca, iż „uwzględnienie tłumienia drgań w układzie zmiany wysięgu żurawia samochodowego nie eliminuje możliwości utraty stateczności dynamicznej układu”, została sformułowana poprawnie. chociaż moim zdaniem, w sposób minimalistyczny. Oprócz bowiem ogólnego stwierdzenia o wpływie tłumienia na drgania rozpatrywanej konstrukcji, ważnym elementem jest również, rozpatrywane szeroko przez Autorkę, a zgrupowane w drugim rozdziale pracy (podpunkt drugi dotyczący „osiągnięcia celu pracy”), zagadnienia technologiczne co zresztą szerzej zostało przez Autorkę opisane, w części dotyczącej celu pracy.

Cel opiniowanej pracy nie został sformułowany precyzyjnie. Autorka stwierdza bowiem, iż celem pracy jest „modelowanie i analiza stateczności dynamicznej układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego z uwzględnieniem wpływu różnego rodzaju tłumienia drgań na jego stateczność dynamiczną.” W moim przekonaniu nie „modelowanie i analiza ...” jest celem pracy. Jest nim przede wszystkim udowodnienie, iż uwzględnienie tłumienia drgań w układzie zmiany wysięgu żurawia samochodowego nie eliminuje możliwości utraty stateczności dynamicznej układu. Tak więc celem pracy jest udowodnienie (lub zaprzeczenie) tezy pracy z uwzględnieniem modeli wybranych elementów konstrukcyjnych i właściwości technologicznych analizowanego układu.

Pozytywnie odbieram pełne zaprezentowanie zakresu pracy i związaną z nim metodykę badawczą, której kolejne etapy są realizowane poprzez osiąganie, celów częściowych. Tego typu struktura działań prawidłowo koreluje zarówno z zagadnieniami naukowymi jak i badawczo technologicznymi

Biorąc pod uwagę materiał zawarty we wprowadzającym rozdziale pierwszym pracy, rozdział drugi, zatytułowany „Cel i zakres pracy”, również kolejne rozdziały pracy oraz jej tytuł, stwierdzam, iż należący do grupy problemów z zakresu mechaniki oraz budowy i eksploatacji maszyn, zaprezentowany temat rozprawy jest aktualny i ważny, zarówno z punktu widzenia naukowego jak i inżynierskiego. Przyjęty zakres realizacji pracy gwarantuje osiągnięcie prawidłowej oceny tezy pracy.

Wspomniane wcześniej uwagi nie mają większego merytorycznego znaczenia w ocenie pracy. Zaproponowany zakres pracy wyczerpuje w pełni warunki, jakie są standardami podczas realizacji tego typu prac.

2. Struktura i charakterystyka pracy

Podzielona na kilka części, opiniowana praca składa się z pięciu rozdziałów zasadniczych, streszczeń w języku polskim i angielskim, spisu literatury, wykazu ważniejszych oznaczeń oraz załącznika („D1. Elementy macierzy współczynników”), który Autorka pracy nazwała dodatkiem oraz spisu treści. Całość została zaprezentowana na 107 stronach. Wykaz literatury obejmuje 197 pozycji; ich wybór można uznać za trafny, choć nie bez zastrzeżeń. Układ edytorski pracy został dopracowany starannie; mam jednak kilka uwag szczegółowych, które zostały zaprezentowane w dalszym rozdziale przedmiotowej recenzji.

W pierwszym rozdziale pracy dokonano analizy stanu wiedzy ze szczególnym uwzględnieniem literaturowego przeglądu zagadnień, które dotyczą dynamicznych cech żurawi samochodowych, a w tym precyzyjnego opisu wybranych ich elementów. Autorka dokonała starannego i obszernego przeglądu literaturowego zagadnień dotyczących szeroko rozumianego tłumienia drgań - typów tłumienia występujących w maszynach. Obok samego zestawienia omówiono stan podstawowej wiedzy o tłumieniu konstrukcyjnym, wewnętrznym i zewnętrznym. Przypomniano podstawowe powszechnie wykorzystywane w opisie drgań, modele zawarte w literaturze. Znaczna część rozdziału dotyczy podziału tłumienia drgań ze względu na źródło jego pochodzenia. W końcowej części rozdziału Autorka przytacza szczegółowe powszechnie znane rozwiązanie problemu poprzecznych drgań tłumionych belki Bernoulliego-Eulera podpartej przegubowo na dwóch końcach. Powód umieszczenia w tym miejscu szczegółowego rozwiązania znanego problemu znajduje czytelnik w stwierdzeniu, iż zarówno przedstawiona metoda jak i rozwiązanie zagadnienia będą wykorzystane w dalszej części opracowania.

W drugim rozdziale pracy sformułowano jej cel i zakres. Odniosłem się do tych zagadnień we wcześniejszej części przedmiotowej opinii.

Trzeci rozdział obejmuje właściwą metodykę badań, gdzie skupiono się na omówieniu i sformułowaniu używanych na dalszych etapach modeli matematycznych i wyników badań numerycznych i symulacyjnych. Przedstawione zostały badania i ich wyniki dotyczące wpływu różnych rodzajów tłumienia na stateczność dynamiczną stalowej jednorodnej belki Bernoulliego-Eulera przegubowo podpartej na końcach i obciążonej zmienną siłą osiową. Zaprezentowano w tej części pracy ustalone wartości współczynników tłumienia (N , M i H),

częstości własne ω_i (dla układu bez tłumienia) i wartości własne (dla belki z tłumieniem drgań), współczynnik tłumienia c wpływający na kształt krzywej przejścia między obszarami statecznymi i niestatecznymi rozwiązania równania Mathieu oraz współczynnik ϵ dla pierwszego obszaru niestateczności układu $\epsilon - \delta$. Omówiono relacje między parametrami δ i ϵ naniesione na kartę Strutta dla analizowanych przypadków. Wskazano, że uwzględnienie tłumienia konstrukcyjnego w podporach belki zwiększyło stateczność dynamiczną układu, a tłumienie ośrodka zmniejszyło obszar niestateczny i spowodowało, że układ w całym analizowanym zakresie δ miał rozwiązania stateczne. Wykazano, że tłumienie

wewnętrzne nie spowodowało znaczących zmian stateczności w stosunku do układu nietłumionego, a uwzględnienie tłumienia ośrodka i podpór znacząco wpłynęło na stateczność dynamiczną analizowanego przypadku przenosząc rozwiązania w obszar rozwiązań statecznych, w całym badanym zakresie.

Kolejny rozdział dysertacji, to analiza poprzecznych drgań z uwzględnieniem tłumienia układu zmiany wysięgu żurawia FABLOK DST0285. Z punktu widzenia dokonań naukowych oraz nowatorskich elementów pracy materiał zawarty w tych rozdziałach jest najważniejszy.

Doktorantka przedstawia w nim propozycję opisu modeli badanego obiektu technicznego uzupełniając je o szeroko rozumiane tłumienie, precyzyjnie formułuje ich opis matematyczny, rozwiązuje zagadnienia brzegowe i przedstawia obszerną prezentację graficzną wyników badań (wraz z załącznikiem w postaci elementów macierzy współczynników).

Ostatni rozdział pracy nosi tytuł „Wnioski i uwagi końcowe”. Materiał w nim zawarty jest syntetycznie przedstawiony i zawiera minimalistyczne omówienie interpretacji wyników badań jakie zawarte są w poprzednich dwóch rozdziałach. Tego typu skromne treści ostatniego rozdziału są uzasadnione, jako że pełne i szczegółowe omówienie wyników i ich analiz zostało przedstawione w rozdziale poprzedzającym.

Część merytoryczną pracy zamykają spis bibliografii oraz załącznik, nazwany przez Autorkę dodatkiem.

3. Ogólna ocena i uwagi dotyczące rozprawy

Jak już wcześniej wspomniano, zaproponowany temat rozprawy jest aktualny i ważny zarówno z punktu widzenia naukowego jak i inżynierskiego. Wpisuje się bardzo dobrze w trend badaczy i naukowców stawiających za cel swojej działalności udoskonalanie dotychczasowych i formułowanie nowych modeli konstrukcji, które w sposób bardziej szczegółowy od dotychczas stosowanych, odwzorowują i opisują ich właściwości przybliżając je coraz bardziej do właściwości konstrukcji rzeczywistych.

W rozdziale pierwszym zawarto obszerny przegląd literatury poświęconej tematyce pracy. Informacje zawarte w trzecim podrozdziale (1.3) są zwłaszcza przydatne czytelnikowi, który spotyka się ze zjawiskiem drgań nieczęsto lub zupełnie przypadkowo. W przypadku

pracy doktorskiej, która jest kierowana do grupy osób, zajmujących się podobnymi zagadnieniami lub je znających dogłębnie uważam, że znajdujący się tam materiał powinien być znacznie ograniczony bez szkody dla całości pracy. Dotyczy to zwłaszcza wiadomości podstawowych, które się tam znalazły. W odniesieniu do podrozdziału 1.3 mam na myśli m.in. szczegółowy opis i dyskusję zjawiska tłumienia konstrukcyjnego, wewnętrznego, zewnętrznego oraz pojęć podstawowych i publikacji bezpośrednio z nimi związanych.

W bardzo krótkim rozdziale drugim przedstawiła Autorka zasadniczą problematykę, jaka została zaprezentowana w dysertacji. Uważnie czytając ten tekst można dopatrzeć się w nim dwóch ważnych dla pracy wątków. Przedstawiono cel pracy, sformułowano poprawnie tezę oraz opisano podział metodologii badawczej na etapy i zadania. Dwa niezbędne elementy struktury pracy (cel i teza) zostały w niej, w sposób bezpośredni sformułowane, lecz mankamentem jest brak szerszego opisu zagadnienia technologicznego i opisanej zakładanej metodyki badawczej w odniesieniu do zidentyfikowanych barier naukowych, jakie mają być przełamywane w ramach działań poznawczych.

Wysoko oceniam materiał zgromadzony w rozdziale trzecim i czwartym dysertacji dotyczący opisu dynamicznych cech żurawia samochodowego oraz modeli matematycznych.

W ramach prezentacji gotowych rozwiązań konstrukcyjnych przedstawiony został żuraw samochodowy FABLOK DST0285 produkcji „Bumar-Fablok” w Chrzanowie, w pozycji transportowej oraz w pozycji rozłożonej. To właśnie ten rzeczywisty obiekt techniczny jest przedmiotem analizy w omawianych rozdziałach pracy.

Wynikiem przeglądu literaturowego, który znajduje się w pierwszym rozdziale pracy, jest wskazanie kilku schematów zespołów konstrukcyjnych i modeli podstawowych, stanowiących bazę do budowy bardziej złożonych modeli, które są przedmiotem dalszej analizy.

Cennym materiałem porządkującym pracę są informacje zgromadzone w podrozdziale, który dotyczy podziału zjawiska tłumienia drgań. Z niektórymi stwierdzeniami znajdującymi się w literaturze toczy się nieustająca dyskusja zwłaszcza dotycząca tłumienia konstrukcyjnego. I między innymi dlatego za cenny należy uznać dla przeciętnego czytelnika, klarowny podział jakiego dokonała Autorka w tym zakresie, wskazując jasno co rozumie, na potrzeby badań, pod każdym z wymienionych rodzajów tłumienia.

Procedura rozwiązania zagadnienia brzegowego tłumionej belki Bernoulliego-Eulera jest znana. Ponieważ jednak Autorka korzysta z niej w dalszej części pracy jej dość szczegółowa prezentacja w rozdziale pracy wydaje się być absolutnie uzasadniona.

Dobór wartości współczynników tłumienia układu, jakie zostały przyjęte do badań został dokonany prawidłowo, a przyjęte wielkości są akceptowalne dla różnych odmian tłumienia.

Za cenne i interesujące w rozdziale 4., należy uznać same badania i ich wyniki odnoszące się do otrzymanego modelu układu przy wartości ϵ dla pierwszego obszaru niestatecznego ($\delta = 0,25$) przy trzech różnych rodzajach tłumienia. Wykazano, że wzrost wartości współczynnika tłumienia zewnętrznego N_S powodował nieznaczne zwiększenie stateczności układu poprzez zmniejszenie wartości parametru ϵ przy jednoczesnym zwiększeniu wartości minimum obszaru niestatecznego $\epsilon_{\min}$. Układ stał się stateczny dla współczynnika tłumienia zewnętrznego równego $N_S = 6,15$. Co ciekawe tłumienie wewnętrzne H_S nie wpłynęło znacząco na stateczność układu. Tłumienie konstrukcyjne M_S zgodnie z przewidywaniami obniżało wartość parametru ϵ , lecz nie eliminowało możliwości wystąpienia zjawiska rezonansu parametrycznego, ponieważ nie zmniejszało zakresu obszarów niestatecznych. Przy takich założeniach badawczych uwzględnienie trzech rodzajów tłumienia bardziej stabilizowało układ. Stawał się on stateczny dla wartości tłumienia zewnętrznego $N_S = 3,94$ oraz tłumienia konstrukcyjnego $M_S = 1,23 \cdot 10^{-2}$, co odpowiadało $r = 58,87\%$. Każde dalsze zwiększanie tłumień powodowało, że rozwiązania stateczności dynamicznej układu były stateczne. Rozwiązania te znajdowały się w całości w obszarach rozwiązań statecznych na karcie Strutta. Powyższe wnioski uważam za kluczowe dla przedmiotowej pracy.

W przypadku wskazanego rzeczywistego obiektu technicznego zaproponowane zostały modele wysięgników żurawi, które zostały rozbudowane o elementy charakteryzujące wszystkie rodzaje tłumienia w nich występującego wraz z modelem cieczy wypełniającej cylinder siłownika.

Zarówno wyznaczenie różniczkowych równań ruchu belek modelujących układ, jak również sformułowanie matematyczne i rozwiązanie zagadnienia brzegowego zostały wykonane poprawnie i zaprezentowane w przejrzysty sposób. Ta przejrzystość prezentacji wynika m.in. z zastosowania przez Autorkę „dydaktycznej” metody prezentacji wszystkich wzorów i przekształceń bez uciekania do odwołań literaturowych, co zostało zrekompensowane w rozdziale pierwszym obejmującym badanie stanu wiedzy i techniki dotyczącym rozpatrywanych zagadnień.

Wysoko oceniam tę metodę prezentowania wzorów. Obok łatwości śledzenia analizowanego problemu zapewnia ona również jednoznaczność i konsekwencję wprowadzonych oznaczeń, które w całej pracy, w każdym z analizowanych przypadków oznaczają te same wielkości – zgodne ze spisem oznaczeń jaki przedstawiono.

Prezentacja graficzna rezultatów badań obejmuje liczne rysunki, na których zamieszczono również wykresy ilustrujące zależności zmian pierwszej i drugiej częstości drgań układu w zależności od kąta nachylenia, długości i obciążenia wysięgnika jego parametrów geometrycznych (począwszy od rys. 4.13 i kolejne).

Obejmująca liczne inne rysunki grupa wykresów odwzorowuje wpływ zmian wartości wybranego parametru układu na zmiany wartości pierwszej rzeczywistej i drugiej częstotliwości wartości własnej zmiany wysięgu modelu żurawia.

Pozytywnie należy ocenić również dołączone podsumowanie, które w zwięzłej formie zawiera najważniejsze ustalenia wynikające z analizy szczegółowej prezentacji graficznej wyników badań.

Najważniejszym stwierdzeniem, które znajduje się w tym rozdziale jest to, że rezultaty przeprowadzonych badań udowodniły, iż możliwym jest prawidłowe modelowanie i analiza stateczności dynamicznej układu zmiany wysięgu żurawia samochodowego z uwzględnieniem wpływu różnego rodzaju tłumienia drgań na jego stateczność dynamiczną, o których mowa w dysertacji.

W swojej dysertacji Autorka udowodniła, iż prezentowane złożone zagadnienia badawcze potrafi rozwiązać w sposób analityczny przeprowadzając klasyczne obliczenia analityczne, numeryczne i symulacyjne. W moim przekonaniu będąc zwolenniczką stosowania do rozwiązywania problemów dynamicznych złożonych struktur technicznych metod analitycznych Autorka prezentuje ważny kierunek badawczy, który powinien być, ze względu na matematyczną dokładność opisu badanych układów kontynuowany.

4. Uwagi dotyczące pracy

1. Układ pracy moim zdaniem został w zasadzie poprawnie przemyślany. W mojej ocenie uważam jednak, że korzystne by było zamieszczenie poprzedzonego krótkim wstępem nieco rozbudowanego rozdziału „Cel i zakres pracy” przed obszernym przeglądem literatury.
2. Nieco razi duża różnica objętościowa rozdziałów: dwustronicowy (rozdz.2) i kilkudziesięciostronicowe rozdziały 1., 3. i 4. oraz znowu 2-stronicowy rozdział 5.
3. Praca została napisana i sprawdzona niezwykle starannie. Bardzo rzadko się zdarza by w obszernym opracowaniu znalazło się tak mało potknięć literowych, chociaż sporo interpunkcyjnych.
4. Znaczna część pozycji literaturowych wymienionych w pracy to opracowania to pozycje sprzed więcej niż dziesięciu lat; niektóre zaawansowane historycznie. Tematyka pracy porusza zagadnienia aktualne i często analizowane przez liczne zespoły badawcze (w tym również w macierzystej uczelni Autorki).
5. Dobrym zwyczajem jest, gdy na końcu rozprawy doktorskiej, która jest realizowana pod kierunkiem Promotora i zazwyczaj w określonym zespole Kolegów, czytelnik znajduje krótką notkę zawierającą podziękowania skierowane pod ich adresem. Takie zakończenie dysertacji, w żadnym stopniu nie umniejsza dorobku naukowego pracy, ale stanowi ważny element, w propagowaniu dobrych zasad jakie powinny

obowiązywać podczas realizacji naukowych i badawczych zadań, które są wykonywane w zespołach badawczych. Niestety w tej rozprawie nie odnalazłem takiego odniesienia.

Dla merytorycznej oceny pracy powyższe uwagi nie mają praktycznie żadnego znaczenia.

5. Końcowa ocena pracy

Oceniając całość zaprezentowanej rozprawy należy podkreślić istotną wagę naukową i techniczną, sformułowanego w tytule, głównego jej problemu. Zadanie zostało sformułowane właściwie, a jego realizacja dokonana z pełnym powodzeniem. Potwierdziła się słuszność poprawności przyjętej metodyki postępowania zmierzającej do udowodnienia sformułowanej na wstępie tezy pracy, jak również osiągnięcia jej celu.

Zarówno rozbudowane przez Autorkę modele badanych urządzeń, ich opis matematyczny, a także sformułowanie równań i warunków brzegowych oraz ich analityczne rozwiązania, także choć ograniczone, ale ważne, badania z pogranicza eksperymentalnych, oraz obliczenia numeryczne wykonane zostały starannie i poprawnie. Otrzymane wyniki badań zostały zaprezentowane w przejrzystej formie, ich wiarygodność nie budzi najmniejszych zastrzeżeń. Wnioski sformułowane przez Autorkę są dowodem jej dużej wiedzy, w zakresie umiejętnego formułowania problemów naukowych i technicznych, ich modelowania oraz interpretacji rezultatów badań podstawowych i wczesnych badań przemysłowych charakterystycznych dla początkowych poziomów gotowości technologicznej, które mogą być wykorzystane w rozwiązywaniu problemów technicznych na dalszych etapach postępu badawczego. Rozwiązując określone w tytule pracy zadanie, Autorka wykazała się dobrą znajomością zagadnień dotyczących dynamicznych cech analizowanych żurawi, wycuciem problemów technicznych, dobrą znajomością zagadnień modelowania i analizy dynamicznych właściwości omawianej grupy urządzeń; dzięki temu udało się jej rozwiązać interesujące zadanie naukowe.

Biorąc pod uwagę przedstawiony mi do zaopiniowania materiał, oryginalność rozwiązanego w rozprawie istotnego zagadnienia naukowego, a tym samym fakt umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej uważam, że przedłożona rozprawa może służyć za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatce stopnia doktora nauk technicznych.

Wobec spełnienia wymogów artykułu 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” formułuję wniosek o dopuszczenie formułuję wniosek o dopuszczenie mgr inż. Justyny Garus do publicznej obrony opiniowanej pracy jako pracy doktorskiej reprezentującej dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna.

Niniejszą opinię przedkładam Panu dr. hab. inż. Januszowi Szmidla, prof. PCz
Przewodniczącemu Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki
Częstochowskiej zlecniodawcy powyższej recenzji.

Dr hab. inż. Marcin Bajkowski prof. PW