



Bielsko-Biała dn. 16.12.2024

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Roberta Salomona**
z tytułowanej

Identyfikacja parametrów i weryfikacja doświadczalna modelu matematycznego wybranych nieliniowych układów mechanicznych

Promotor: dr hab. inż. Grażyna Sypniewska-Kamińska

Promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Fritzkowski

1. Podstawa opracowania

Niniejszą recenzję opracowano na podstawie pisma dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej z dnia 29.10.2024 - pismo DIM.075.276.2024.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska liczy 138 stron, zawierających: spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń, 10 rozdziałów, trzy dodatki oraz wykaz cytowanej literatury.

W pierwszej części rozdziału pierwszego zaprezentowano aktualny stan wiedzy w zakresie podjętego problemu badawczego, tj. metod identyfikacji współczynników tłumienia aerodynamicznego niektórych modeli tłumienia na podstawie modeli matematycznych wybranych układów mechanicznych oraz przeprowadzonych eksperymentów. W drugiej części tego rozdziału przedstawiono cel i zakres rozprawy, a następnie sformułowano tezę naukową w następującym brzmieniu:

„Proponowane metody eksperymentalnego wyznaczania parametrów modelu siły oporu ośrodka dają podstawy do szerokiej analizy zachowania układu mechanicznego opartej o realistyczne dane”.

W rozdziale drugim szczegółowo omówiono stosowane w rozprawie modele oporu aerodynamicznego. Przedstawiono ogólną postać równań Naviera-Stokesa opisujących oddziaływanie ciała stałe – płyn. Zastosowanie tych równań skutkuje złożonością modelu matematycznego, a ich rozwiązanie wymaga użycia zaawansowanych metod numerycznych. Takich niedogodności nie mają modele uproszczone, wykorzystujące wzory Stokesa.

W rozdziale trzecim przedstawiono istotę metod identyfikacji wielkości fizycznych. Jest to ważny problem, gdyż w rozpatrywanych zagadnieniach odwrotnych może wystąpić przypadek, dla którego rozwiązanie będzie niejednoznaczne lub niestabilne. Co więcej, jeśli poszukuje się współczynników tłumienia dla układów mechanicznych, w ich modelach może występować kilka współczynników, których wartości są nieznane.

W rozdziale czwartym przedstawiono modele matematyczne rozważanych układów mechanicznych, tj. wahadła płaskiego i sferycznego z punktem zawieszenia poruszającym się po okręgu. Do wyprowadzenia równań dynamiki stosowano równania Lagrange’a II rodzaju.

W rozdziale piątym przedstawiono stanowiska badawcze (wahadła) oraz aparaturę do pomiaru położenia wybranych punktów (markerów). Eksperyment wykonano dla czterech wariantów wahadeł o różnych długościach. Ponadto dla wahadła sferycznego w każdym wariacie uwzględniono dodatkowo kulkę zamocowaną w dolnej jego części. Dobrym rozwiązaniem był sposób połączenia wahadła z ostoją (para obrotowa) oraz obrotową tarczą (para kulista). Zastosowano połączenie nierozciągliwym, wiotkim cięgnem, które praktycznie wyeliminowało tarcie, jakie występowałoby w klasycznej parze kinematycznej, a które zaburzałoby badanie zjawiska oporu aerodynamicznego. Wielkości zmierzone i zarejestrowane (współrzędne markerów) przeliczono następnie na współrzędne uogólnione równań dynamiki.

Rozdział szósty poświęcono identyfikacji współczynników siły oporu aerodynamicznego działającej na wahadło płaskie. Zastosowano kilka metod optymalizacji do wyznaczenia minimalnej wartości funkcji celu zdefiniowanej jako średnia kwadratowa błędów między pomiarami a rozwiązaniami numerycznymi dla określonych warunków początkowych. Współczynniki dla modelu z jednym współczynnikiem i z dwoma współczynnikami identyfikowano stosując metodę bisekcji oraz gradientu prostego. Do identyfikacji modelu z trzema współczynnikami zastosowano metodę gradientu prostego. W przypadku modelu z jednym współczynnikiem wyznaczono wartość liczbową tego współczynnika (β_1). Porównując przebiegi kąta obrotu wahadła dla różnej konfiguracji początkowej wyznaczone z

modelu numerycznego z pomiarami dla określonej wartości współczynnika (β_1), otrzymano różne wartości współczynnika korelacji, nie zawsze potwierdzające zgodność przebiegów. Podczas identyfikacji modelu z dwoma współczynnikami (β_1, β_2) obie metody się nie sprawdziły. Otrzymano ujemną wartość współczynnika β_1 . Na tej podstawie wyciągnięto wniosek, że modele z jednym współczynnikiem oraz z dwoma współczynnikami nie są odpowiednie do opisu wpływu tłumienia ośrodka na dynamikę wahadła dla dużych wartości kąta wychylenia. To skłoniło do podjęcia decyzji o przyjęciu modelu z trzema współczynnikami i zastosowania metody gradientu prostego.

W rozdziale siódmym przedstawiono nieco inne podejście do identyfikacji współczynników modelu z trzema współczynnikami, polegające na zastosowaniu metody nazwanej „minimalizacją błędu spełnienia równań ruchu”, która polegała na dokładniejszym dopasowywaniu modelu do eksperymentu, a tym samym lepszym oszacowywaniu poszukiwanych współczynników. Wybór takiego podejścia uzasadniono tym, że wyniki pomiarów, stanowiące punkt odniesienia dla zadania optymalizacji, nie są dokładne, a błędy, którymi są obciążone, mogą znacząco wpływać na wartości obliczanych współczynników. Przyjęcie takiej metody wymagało jednak wyznaczenia wielkości, które nie były mierzone w trakcie eksperymentu, tj. prędkości i przyspieszenia kąowego. Do ich wyznaczenia zastosowano schematy różnic skończonych.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono dowód na to, że model tłumienia zawierający trzy współczynniki może być z powodzeniem stosowany nie tylko do modeli numerycznych, ale również do przybliżonych modeli analitycznych wyznaczonych metodami asymptotycznymi.

W ostatnim, dziesiątym rozdziale, na podstawie przeprowadzonych eksperymentów oraz wyników obliczeń, sformułowano wnioski i przedstawiono kierunki dalszych prac.

Rozprawę kończy wykaz cytowanej literatury (102 pozycje).

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Na podstawie gruntownego przeglądu literatury, Doktorant wykazał ważność i aktualność tematyki podjętej w rozprawie doktorskiej. Warto podkreślić, że w większości cytowanych prac, badacze ograniczają się do liniowego modelu tłumienia aerodynamicznego, pomijając składnik zależny od kwadratu prędkości oraz składnik proporcjonalny do przyspieszenia.

Uważam, że temat badawczy podjęty przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej jest **oryginalny, aktualny i wpisuje się w dyscyplinę naukową Inżynieria mechaniczna.**

W Streszczeniu Doktorant pisze „*W pracy rozważano dwa układy mechaniczne: ruch płaski pojedynczego wahadła fizycznego w stanie nieustalonym oraz ruch przestrzenny wahadła z ruchomym punktem zawieszenia w stanie ustalonym*”. Moim zdaniem to sformułowanie jest błędne a jest powielane w całej rozprawie. Rodzaj ruchu nie jest układem mechanicznym. Natomiast układem mechanicznym jest wahadło, którego rodzaj determinuje wykonywany ruch. Ponadto pierwszy rozważany układ nie wykonuje ruchu płaskiego lecz ruch obrotowy (rys. 4.1. i 5.1). Wystarczyłoby użyć w rozprawie określeń wahadło płaskie oraz wahadło sferyczne.

Teza naukowa, tak istotny element rozprawy doktorskiej, nie została właściwie wyeksponowana w tekście rozprawy. Ponadto nie została sformułowana jasno ani precyzyjnie, lecz jest na tyle ogólnym stwierdzeniem, że nie wymaga dowodzenia.

W rozdziale czwartym (str. 41) nie zapisano jakiej konwencji oznaczania kątów użyto do opisu ruchu wahadła sferycznego. Macierze zapisane zależnościami (4.54) i (4.55) nie są macierzami obrotu (rotacji), a ich odwrotnościami lub transpozycją (własność ortogonalności).

Poza podaniem długości, średnicy pręta wahadła nie podano pozostałych wymiarów wahadeł (rys. 10.1, 10.2 i 10.3). Wprawdzie podano wartości masy i masowych momentów bezwładności wahadła (Tab. 5.1), jednak na podstawie podanych wymiarów recenzent nie miał możliwości sprawdzenia poprawności ich wyliczenia. Co jest istotne, gdyż Doktorant przyjął moment bezwładności względem osi pręta za zerowy i pominął składnik z nim związany w zależności na energię kinetyczną wahadła bez oceny zasadności takiego uproszczenia. Nie podano również położenia środka masy wahadeł.

Zdaniem recenzenta rozprawę wzbogaciłoby przedstawienie wartości siły aerodynamicznej dla wyznaczonych współczynników oraz dokonanie porównania wybranej/wybranych wielkości charakteryzujących ruch wahadła wyznaczonych dla modelu uwzględniającego i pomijającego tę siłę. Pożądane byłoby również określenie błędów z jakimi wyznaczono wartości współczynników oporu aerodynamicznego.

Do najważniejszych osiągnięć w recenzowanej rozprawie zaliczam:

1. zaproponowany przez Doktoranta oryginalny sposób wprowadzania siły oporu aerodynamicznego do równań dynamiki wahadeł,

2. opracowanie i zrealizowanie logicznego i spójnego planu badań eksperymentalnych do wyznaczenia współczynników modeli oporu aerodynamicznego dla wahadeł, który może być wykorzystany dla innych układów mechanicznych,
3. przedstawienie różnic między przyjętymi modelami oporu aerodynamicznego wahadeł oraz doświadczalnie wyznaczenie współczynników do tych modeli,
4. dokonanie krytycznej oceny i porównanie metod służących do identyfikacji współczynników oporu aerodynamicznego bazujących na modelu matematycznym wahadła.

Podsumowując, uważam, że wyniki które Doktorant przedstawił mają **dużą wartość w aspekcie poznawczym**. Dostrzegam również możliwość ich **praktycznego wykorzystania**, na przykład w modelach dynamiki żurawi.

4. Uwagi i pytania do rozprawy

1. Czym kierował się Doktorant w doborze kształtu wahadeł?
2. Czy Doktorant potrafi oszacować jak wpłynąłby pominięty składnik energii kinetycznej wynikający z wyzerowania momentu bezwładności wahadła względem osi pręta na wartość identyfikowanych współczynników, zwłaszcza wtedy, gdy do pręta zamocowane jest dodatkowe ciało?
3. Jakie kryterium stopu przyjął Doktorant w metodzie bisekcji?
4. W rozdziale szóstym Doktorant podał wartości współczynników $(\beta_1, \beta_2, \beta_a)$ – Tab. 6.5. W rozdziale siódmym dla tego samego wahadła zostały wyznaczone zakresy tych współczynników $(\beta^{min}, \beta^{max})$ – Tab. 7.10. Jednak nie porównano tych wyników ani nie podano wytycznych do ich stosowania.
Czy Doktorant może wskazać, jak w praktyce na podstawie tych dwóch tabel dobierać te współczynniki?

5. Ocena redakcyjna i edycyjna rozprawy

Uważam, że **rozprawa jest napisana w sposób poprawny**. Używany przez Doktoranta język jest precyzyjny i zrozumiały. **Zachowano ciągłość rozumowania i sformulowano logiczne wnioski**.

Poniżej zestawiono kilka propozycji, które mogłyby zdaniem recenzenta poprawić strukturę i czytelność rozprawy.

1. Zdaniem recenzenta rozdziały drugi (2,5 strony), trzeci (1,5 strony) oraz część teoretyczna rozdziału dziewiątego (ok. 10 stron) powinny zostać scalone w jeden rozdział (konkretnie drugi) wprowadzający w tematykę stosowanych w rozprawie modeli oporu ośrodka, metod identyfikacji współczynników tych modeli oraz metod rozwiązywania równań różniczkowych nieliniowych.
2. Rozdziały szósty oraz siódmy mogłyby być również scalone w jeden. Tytuł podrozdziału 6.4 jest również częścią tytułu rozdziału siódmego. W obu tych rozdziałach identyfikowane są współczynniki modelu oporu aerodynamicznego dla tego samego układu (wahadło płaskie) – w rozdziale szóstym modelu z jednym współczynnikiem oraz dwoma i trzema współczynnikami, a w rozdziale siódmym dla trzeciego modelu.
3. W rozdziale czwartym można zauważyć niekonsekwencję w oznaczeniu masowych momentów bezwładności. W przypadku wahadła płaskiego używany jest symbol I_0 (np. 4.3), następnie I_O (np. 4.3, 4.5), czy I_o (np. 4.23, 4.26) do oznaczenia masowego momentu bezwładności wahadła względem osi przechodzącej przez punkt zamocowania. Z kolei w przypadku wahadła sferycznego symbol I_0 użyto do oznaczenia centralnych masowych momentów bezwładności względem osi prostopadłych do wahadła. W tensorze bezwładności \hat{I}_C należało użyć do zapisu momentów symbolów I_{x_C} , I_{y_C} , I_{z_C} . Byłoby to zgodne z rys. 4.3 oraz literaturowym zapisem tensora.
4. W rozprawie można zauważyć niekonsekwencję w zapisie wektorów. Doktorat używa trzech zapisów: z użyciem wersorów osi, w postaci wektorów wierszowych oraz kolumnowych. Zalecane byłoby ujednoczenie zapisu wektorów.

W tekście rozprawy zauważono następujące nieliczne błędy literowe, interpunkcyjne i drobne usterki:

1. symbol "d" w wyrażeniach różniczkowania nie jest zmienną a działaniem, dlatego nie powinien być pisany kursywą, np. $\frac{d\vec{r}}{d\varphi}$,
2. str. 7₉ i 27⁷ – błąd w nazwisku: jest Morisona, ma być Morrisona,
3. str. 7₁ – brak słowa „skal” w zdaniu: jest „Dodatkowo zagadnienie ruchu płaskiego wahadła rozwiązano analitycznie za pomocą metody wielu w dziedzinie czasu”, ma

być „Dodatkowo zagadnienie ruchu płaskiego wahadła rozwiązano analitycznie za pomocą metody wielu skal w dziedzinie czasu”,

4. str. 10₉ i 31₈ – błędny opis energii potencjalnej – „potencjał sił potencjalnych”,
5. str. 36 – błąd w równaniu (4.38): jest $f = \frac{2F_0}{mgL}$, ma być $f = \frac{2M_0}{mgL}$,
6. str. 61 wzór (5.2), str. 63 równanie (5.8) – brak konsekwencji w zapisie liczby klatek,
7. str. 61 błąd w zapisie równania (5.2) : jest $\sum_{k=1}^N(\dots)$, ma być $\sum_{i=1}^N(\dots)$ oraz jest: $\hat{x}(k)$, $\hat{y}(k)$, ma być $\hat{x}(t_i)$, $\hat{y}(t_i)$,
8. str. 72₁₅ – błędne odniesienie do tabeli: jest Tab. 6.4, ma być Tab. 6.2,
9. str. 90 – brak jednostek na rys. 7.1 i 7.2,
10. str. 91 – brak jednostek na rys. 7.3,
11. str. 92 – wektor φ_i^j w równaniu (7.27) i (7.28) nie może być argumentem funkcji trygonometrycznej,
12. str. 114 – brak jednostek na rys. 9.1 i 9.2,
13. str. 123, rys. 10.1 i 10.2, str. 126, rys. 10.3 – rysunki wykonane niezgodnie z zasadami rysunku technicznego.

Wykaz literatury został przygotowany właściwie z zachowaniem standardów prac naukowych. Wszystkie wyszczególnione w nim pozycje zostały zacytowane w tekście rozprawy.

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

W opiniowanej rozprawie Doktorant przedstawił oryginalne autorskie rozwiązanie problemu naukowego, co świadczy o tym, że potrafi samodzielnie formułować i rozwiązywać problemy badawcze. Wykazał się przy tym odpowiednią wiedzą teoretyczną, umiejętnościami w zakresie przeprowadzania symulacji numerycznych i przygotowania eksperymentu.

Rozprawę mgr. inż. Roberta Salomona zatytułowaną „*Identyfikacja parametrów i weryfikacja doświadczalna modelu matematycznego wybranych nieliniowych układów mechanicznych*” **oceniłam pozytywnie**. Uważam, że w **wystarczającym stopniu spełnia ona warunki stawiane rozprawom doktorskim** określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 1668 z późn. zm.).

Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria mechaniczna Politechniki Poznańskiej.



