

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Kudra
Katedra Automatyki, Biomechaniki i Mechatroniki
Wydział Mechaniczny
Politechnika Łódzka

WPŁYNEŁO		002/7.01.2025	
9.01.2025		data	
Kierownik administracyjny		wydziału	
nr pisma	podpis		
mgr Kamila Czerniak			

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Roberta Salamona
pt. „Identyfikacja parametrów i weryfikacja doświadczalna modelu
matematycznego wybranych nieliniowych układów mechanicznych”

1 Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie pisma DIM.075.276.2024 Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej w Politechnice Poznańskiej, dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP, z dnia 29 października 2024 roku i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr. inż. Roberta Salamona pt. „Identyfikacja parametrów i weryfikacja doświadczalna modelu matematycznego wybranych nieliniowych układów mechanicznych” napisana pod kierunkiem dr hab. inż. Grażyny Sypniewskiej-Kamińskiej (promotor rozprawy) i dr. inż. Pawła Fritzkowskiego (promotora pomocniczego).

2 Ogólna charakterystyka i zawartość rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska liczy łącznie 138 strony i składa się z 10 rozdziałów, w tym „Wstępu” i „Wniosków”. Bezpośrednio po spisie treści następują streszczenia w języku polskim i angielskim, a po nich wykaz ważniejszych oznaczeń. Praca zawiera również trzy dodatki, a kończy ją spis literatury obejmujący 102 pozycje uporządkowane w kolejności alfabetycznej.

W rozdziale 1 zatytułowanym jako „Wstęp” dokonano przeglądu najważniejszych zagadnień dotyczących modelowania matematycznego i identyfikacji układów mechanicznych. Szczególny nacisk położono na problematykę mechanizmów rozpraszania energii i modelowania oporów ruchu, zwracając również uwagę na aspekty oporów ruchu ciał poruszających się w płynach i efekt tzw. „masy dodanej”. Po przeglądzie literatury stanowiącym część tego rozdziału, sformułowano cel pracy jako opracowanie metod przeznaczonych do wyznaczania wartości współczynników modeli matematycznych siły oporu powietrza występującej w ruchu układów mechanicznych. Do zakresu pracy zaliczono budowę modeli matematycznych, stanowisk doświadczalnych, identyfikację współczynników tłumienia i walidację modeli dwóch układów mechanicznych: pojedynczego płaskiego wahadła fizycznego wykonującego drgania swobodne oraz wahadła przestrzennego zawieszonego przegubowo w punkcie poruszającym zadany ruchem się po okręgu w płaszczyźnie poziomej. Następnie sformułowano następującą tezę pracy: „Proponowane metody eksperymentalnego wyznaczania parametrów modelu siły oporu ośrodka dają

podstawy do szerokiej analizy zachowania układu mechanicznego opartej o realistyczne dane”.

Rozdział 2 poświęcono przeglądowi i uzasadnieniu modeli oporu ośrodka, które zostały wykorzystane w dalszej części pracy. W rozdziale 3 przedstawiono bardzo krótki przegląd zagadnień identyfikacji.

Rozdział 4 stanowi opis procesu tworzenia modeli matematycznych dwóch układów mechanicznych będących obiektem badań, tzn. pojedynczego pręta zawieszonego w nieruchomym punkcie i poruszającym się ruchem płaskim oraz takiego samego pręta zawieszonego w punkcie poruszającym się po poziomym okręgu. W modelach tych uwzględniono również siły oddziaływania ośrodka, w którym porusza się pręt, zakładając, że na każdy jego element działa siła złożona z trzech składników: proporcjonalnego do wartości składowej prędkości, jej kwadratu oraz proporcjonalnego do składowej przyspieszenia w kierunku prostopadłym do pręta i skierowanych przeciwnie do odpowiednich części prędkości i przyspieszenia.

W rozdziale 5 przedstawiono opis zbudowanych i wykorzystanych w ramach pracy stanowisk badawczych i układów pomiarowych. Opisano również przebieg doświadczeń oraz sposób przetworzenia surowych danych pomiarowych otrzymanych z kamer pomiarowych na dane, które zostały wykorzystane w identyfikacji parametrów.

Rozdział 6 został poświęcony opisowi wyników estymacji parametrów modeli siły oporu w ruchu płaskim wahadła. Wykorzystano w tym celu dane pomiarowe uzyskane podczas drgań swobodnych wahadła o różnych długościach i warunkach początkowych. Minimalizowano funkcję celu w postaci średniej kwadratowej różnicy pomiędzy rozwiązaniem numerycznym równania różniczkowego i danymi pomiarowymi. Szczegółowo opisano zastosowane metody optymalizacyjne, czyli metodę bisekcji i metodę gradientową. Identyfikację przeprowadzono dla trzech wersji modelu: z tłumieniem wiskotycznym, wiskotycznym i proporcjonalnym do kwadratu prędkości i pełnym modelem uwzględniającym dodatkowo składnik związany z efektem masy dodanej. Tylko w tym ostatnim przypadku otrzymano zadowalającą zgodność pomiędzy symulacją numeryczną i danymi doświadczalnymi oraz realne, tj. nieujemne wartości współczynników modelu.

Rozdział 7 dotyczy estymacji wartości współczynników pełnego modelu z trzema składnikami, opartej na zwykłej metodzie najmniejszych kwadratów, w której minimalizacji podlega funkcja będąca sumą kwadratów błędów spełnienia równania różniczkowego wahadła płaskiego. Wykorzystano tutaj te same dane pomiarowe co w przypadku identyfikacji opisanej w rozdziale 6. Niezbędne w tym przypadku doświadczalne prędkości i przyspieszenia kątowe wahadła uzyskano różniczkując numerycznie eksperymentalne położenie kątowe. W tym celu wykorzystano i szczegółowo opisano odpowiednie schematy różnicowe. Przeprowadzono również statystyczną analizę błędów tak wyznaczonych współczynników i uzyskano zgodność z wynikami otrzymanymi w rozdziale 6.

W rozdziale 8 przedstawiono wyniki estymacji parametrów pełnego trójparametrowego modelu oporów dla wahadła przestrzennego z ruchomym punktem zawieszenia. Zastosowano tutaj również zwykłą metodę najmniejszych kwadratów, minimalizując błąd spełnienia równań

wahadła w stanie ustalonym. Okazało się, że otrzymane wyniki nie są wiarygodne ze względu na ujemne wartości niektórych parametrów. Następnie przeprowadzono numeryczną symulację eksperymentu z parametrami oporu powietrza obliczonymi na podstawie wartości współczynników zidentyfikowanych dla drgań swobodnych płaskiego wahadła. Położenia markerów zaburzono losowo zgodnie z dokładnością zastosowanego systemu pomiarowego. Uzyskane wyniki identyfikacji parametrów były obarczone wysokimi błędami. Na tej podstawie wyciągnięto wniosek, że za nieudany proces identyfikacji odpowiada nieodpowiedni eksperyment ze względu na dużą czułość identyfikacji na błędy pomiarowe.

Rozdział 9 rozprawy doktorskiej opisuje rozwiązania równań różniczkowych wahadła płaskiego z przyjętymi modelami oporów powietrza otrzymane metodą wielu skal w dziedzinie czasu.

W rozdziale 10 dokonano podsumowania rozprawy i sformułowano wnioski niej płynące. Przedstawiono również perspektywę kontynuacji badań.

W dodatku A zamieszczono obliczenia masowych momentów bezwładności wahadeł. Dodatek B zawiera szczegółowy opis gradientowej metody optymalizacji zastosowanej w rozprawie. W dodatku C przedstawiono niektóre bardziej skomplikowane obliczenia dotyczące modelu oporu ośrodka w przypadku wahadła z ruchomym punktem zawieszenia.

3 Ocena rozprawy

Podjęty w rozprawie doktorskiej temat dotyczy badań podstawowych w zakresie modelowania i identyfikacji układów mechanicznych, ze szczególnym uwzględnieniem oporów ruchu. Temat ten uważam istotny i interesujący z punktu widzenia naukowego. Jest on również ważny ze względu na potencjalne zastosowania w obszarze modelowania i analizy dynamiki nieliniowej układów występujących w inżynierii mechanicznej i pracujących w nieidealnych warunkach, gdzie występują różnego rodzaju opory, w tym opory powietrza. Cel, zakres i teza pracy zostały sformułowane klarownie i uważam je za ambitne i aktualne.

W analizie dynamiki nieliniowej układów mechanicznych stosowane są najczęściej uproszczone modele oporów ruchu, w tym model tłumienia proporcjonalnego do prędkości. Dużo rzadziej stosuje się modele bardziej złożone, pozwalające uzyskać dobrą zgodność z danymi doświadczalnymi. Ważne jest jednak, aby modele te były jednocześnie odpowiednio proste, umożliwiając efektywne symulacje i analizę badanych układów. W tym kontekście Autor zaproponował przeprowadzenie badań prowadzących do wyznaczenia parametrów i walidacji modelu oporu ruchu wahadła poruszającego się w powietrzu, złożonego z trzech składników: proporcjonalnego do prędkości, jej kwadratu i proporcjonalnego do przyspieszenia, czyli związanego z efektem dodanej masy. Dokonany przegląd literatury wskazuje, że bardzo mało jest prac, gdzie tego typu modele były badane i weryfikowane na podstawie danych doświadczalnych, szczególnie dla obiektów poruszających się w powietrzu. Podjęty temat próbuje wypełnić istniejącą lukę, w tym sensie jego realizacja może stanowić wkład w dyscyplinę inżynierii mechanicznej i oryginalne rozwiązanie problemu badawczego.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam:

1. Budowę stanowisk badawczych umożliwiających identyfikację parametrów prostych układów mechanicznych w postaci pojedynczego wahadła płaskiego i przestrzennego z

ruchomym punktem zawieszenia, w szczególności pozwalających na identyfikację modeli matematycznych oporów ruchu.

2. Opracowanie metod wyznaczania wartości nieznanych parametrów modeli matematycznych nieliniowych układów mechanicznych opartych o dane doświadczalne dających podstawy do analizy tych układów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

3. Wyznaczenie rozwiązań wahadła płaskiego z nieliniowymi oporami ruchu metodą wielu skal w dziedzinie czasu.

Nie wszystkie elementy pracy zakończyły się powodzeniem, co Autor uczciwie przyznaje i opisuje. W szczególności badania wahadła przestrzennego w stanie ustalonym nie pozwoliły na uzyskanie wiarygodnych wyników estymacji parametrów modelu oporu powietrza. Przeprowadzona dodatkowo symulacja numeryczna doświadczenia potwierdziła, że nie pozwala ono na uzyskanie odpowiednio dokładnych wyników.

Jednak większa część celów pracy została osiągnięta. W związku z tym, biorąc pod uwagę wyżej wymienione elementy i osiągnięcia pracy uważam, że Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy badawczej. Ponadto przygotowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Zrealizowanie opisanych w rozprawie badań naukowych dowodzi szerokiej i miejscami dogłębnej wiedzy Doktoranta w zakresie mechaniki, optymalizacji, metod numerycznych i matematycznych analizy układów dynamicznych. Realizacja opisanych badań wymagała ponadto umiejętności zaplanowania, przygotowania i przeprowadzenia badań doświadczalnych układów mechanicznych. Praca zawiera więc eksperyment, modelowanie matematyczne, identyfikację parametrów, symulacje numeryczne oraz badania analityczne i w tym sensie jest to praca kompletna.

4 Pytania i uwagi krytyczne

Uwagi, które wymagają odpowiedzi Doktoranta:

1. Czy sprawdzono poprawność wyprowadzenia wzorów określających masowe momenty bezwładności wahadła względem przegubu? Jakie są błędy obliczeń z wykorzystaniem tych wzorów? Czy uwzględniono połączenia gwintowe?
2. Czy Doktorant wyklucza sytuację, w której współczynnik β_a w równaniu (4.37), czyli w modelu matematycznym wahadła płaskiego, w rzeczywistości nie modeluje efektu „masy dodanej”, ale kompensuje ewentualny błąd związany z obliczeniami masowych momentów bezwładności wahadła względem punktu zawieszenia?
3. Czy jest możliwe, że większość albo pewna część zamodelowanych oporów ruchu w przypadku ruchu swobodnego wahadła płaskiego to nie opory powietrza, ale opory w sznurku stanowiącym przegub w punkcie zawieszenia wahadła?
4. Czy przyjęte położenie punktu zawieszenia wahadła uwzględniało ewentualne poprawki związane z długością linki pomiędzy dwiema stożkowymi końcówkami?

Inne drobne uwagi i usterki:

1. W równaniu (4.7-4.9) na str. 32 wersory osi $\mathbf{i}$ i $\mathbf{j}$ są zamienione względem układu współrzędnych Oxy na rysunku 4.2.

2. Rysunek 4.4 na stronie przedstawiający wahadło przestrzenne zawiera prawie wszystkie elementy rysunku 4.3, poza jednym układem współrzędnych $Cx_Cy_Cz_C$. Wydaje się, że te wszystkie elementy można było zmieścić na jednym rysunku.
3. W równaniu (5.5) określającym sposób obliczenia kąta φ_i na podstawie współrzędnych x_i i y_i , dwa ostatnie przypadki są niepotrzebne, ponieważ pierwsze wyrażenie działa poprawnie również dla kątów $\varphi_i = \pm \frac{\pi}{2}$. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku równania (5.7).
4. W równaniu (5.7) ponadto brakuje indeksu górnego „(S)” przy „ $y_{j,k}(0)$ ” w pierwszym wierszu wyrażen po prawej stronie. Dodatkowo w podanych po prawej stronie warunkach, prawdopodobnie zamienione są zmienne x i y .
5. W podpisie rysunku 6.2 występuje niejasny fragment „w dwóch pierwszych i ostatnich chwilach ruchu”. Prawdopodobnie zamiast chwil, powinny być sekundy.
6. Na stronie 72 występuje błędne odwołanie do Tab. 6.4 – powinno tutaj być raczej odwołanie do Tab. 6.2.
7. Równanie (9.2) nie jest, tak jak napisano przed nim, postacią równania (4.34). Dalej jednak, tj. w równaniu (9.4), podano już prawidłową postać.
8. Na stronie 51 napisano: „W celu weryfikacji uzyskanych wyników, zamiast przegubu kulistego, zastosowano przegub walcowy”. Brakuje tutaj dodatkowych wyjaśnień dotyczących konstrukcji przegubu walcowego.
9. Sposób zapisu nagłówków w tabeli 5.2, tj. „ $m \times 10^{-3}$ [kg]” oraz „ $m \times 10^{-6}$ [kg m²]” sugeruje, że wartości liczbowe w tabeli są wartościami wielkości fizycznych w odpowiednich jednostkach przemnożonymi odpowiednio przez 10^{-3} i 10^{-6} . Aby więc uzyskać pożądane wielkości należałoby wartości z tabeli przemnożyć przez 10^3 i 10^6 . Wydaje się jednak, że jest odwrotnie. Ponadto przy zapisie iloczynów jednostek należy używać znaku kropki, np. kg · m².
10. Na stronie 65 użyto niejasnego sformułowania, tj. napisano: „Wartość drugiej współrzędnej uogólnionej układu β_m w stanie ustalonym nie jest znana. W obliczeniach na podstawie obserwacji przyjęto jej wartość średnią bliską zero”. Tutaj powinno być bardziej ściśle wyjaśnienie, w jaki sposób uzyskano wartość współrzędnej β_m .

Ponadto praca zawiera jeszcze wiele innych drobnych błędów edytorskich lub tzw. literówek, np. „prostoliniowy pręta zawieszony na” na str. 20, „Obliczając pochodną wektora r względem czasu po czasie wektora $\vec{r}$ ” na str. 42, „względem punktu zawieszania wahadła” na str. 50.

5 Wniosek końcowy

Opierając na argumentach zawartych w części 3 tej recenzji oraz mimo krytycznych uwag wymienionych w części 4, oceniam, że zawartość recenzowanej rozprawy doktorskiej świadczy o szerokiej i dogłębnej wiedzy jej Autora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, umiejętności prowadzenia doświadczeń, modelowania matematycznego i identyfikacji układów mechanicznych. Uważam, że w ramach pracy rozwiązano oryginalny problem stanowiący wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna, a jej Autor udowodnił, że posiada umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska mgra inż. Roberta Salamona pt. „*Identyfikacja parametrów i weryfikacja doświadczalna modelu matematycznego wybranych nieliniowych układów mechanicznych*” mieści się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna i spełnia wszystkie warunki stawiane w Ustawie pracom doktorskim. Wniosuję zatem o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Gregorz Kudła