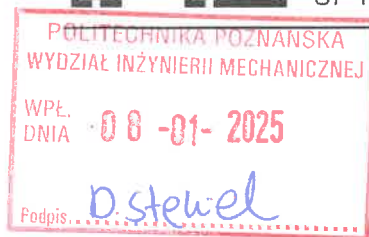




23 grudnia 2024



Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Roberta Salomona

pt. „Identyfikacja parametrów i weryfikacja doświadczalna modelu matematycznego wybranych nieliniowych układów mechanicznych”

wykonanej na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej

Podstawa opracowania

Recenzję rozprawy przygotowano na podstawie pisma przewodniego Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej Pana dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP (dokument nr DIM.075.276.2024 z dnia 10 października b.r.). Przedmiotem opinii jest rozprawa doktorska mgr inż. Roberta Salomona pt. „Identyfikacja parametrów i weryfikacja doświadczalna modelu matematycznego wybranych nieliniowych układów mechanicznych”. Praca została wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Grażyny Sypniewskiej-Kamińskiej prof. PP, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Paweł Fritzowski.

Recenzję przygotowano zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedłożona do oceny praca doktorska zawiera 138 stron. Składa się ze spisu treści, streszczenia w języku polskim oraz angielskim, wykazu ważniejszych oznaczeń, dziesięciu numerowanych rozdziałów oraz trzech dodatków i wykazu bibliograficznego.

W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawił krótki, ale dość przekrojowy przegląd literatury dotyczący symulacji ruchu wahadeł oraz modeli matematycznych opisujących różne mechanizmy rozpra-

szania energii mechanicznej. Szczególną uwagę poświęcono opisowi sił oporu pomiędzy poruszającą się strukturą a otaczającym ośrodkiem ciągłym np. w postaci płynu lub powietrza.

W rozdziale drugim Autor bardziej szczegółowo omówił kilka dostępnych w literaturze przedmiotu modeli obliczeniowych oporu ośrodka. W ramach przygotowanej dysertacji do rozważań zaproponowano wykorzystanie klasycznego modelu tłumienia wiskotycznego, modelu tłumienia wiskotycznego z dodatkową siłą oporu proporcjonalną do kwadratu prędkości oraz trzeciego modelu, w którym tłumienie rozszerzono w stosunku do ostatniego z wymienionych o dodatkowy człon inercyjny - tzw. model z masą dodaną.

W stosunkowo krótkim rozdziale trzecim Doktorant przedstawił problematykę rozwiązywania tzw. odwrotnych zagadnień inżynierskich, a w szczególności problem identyfikacji parametrów modeli analitycznych opisujących dynamikę ruchu ciał sztywnych.

W rozdziale czwartym opisano założenia i podstawy do zasadniczej części badań. Autor wyprowadził równania ruchu wahadła fizycznego w dwu wariantach tj. w ruchu płaskim oraz w ruchu przestrzennym. W wyprowadzonych zależnościach uwzględniono ogólny model siły oporu składający się z trzech wymienionych wyżej składników. Wyprowadzone równania uzupełniono stosownymi warunkami początkowymi.

Rozdział piąty został poświęcony opisowi wykonanych badań doświadczalnych. Przedstawiono wykorzystaną aparaturę pomiarową oraz sposób przeprowadzenia pomiarów.

W rozdziałach numer sześć i siedem Autor opisał identyfikację parametrów zaproponowanych modeli siły oporu w ruchu płaskim. W pierwszej kolejności w rozdziale szóstym omówiono procedurę identyfikacji współczynników siły oporu rozważając kolejno modele z jednym, z dwoma współczynnikami i ostatecznie najbardziej rozbudowany model z dodatkową siłą inercyjną. Wyniki identyfikacji ostatniego z tych modeli zostały wykorzystane do bardziej szczegółowych analiz zawartych w rozdziale siódmym. W tej części rozprawy zaproponowano rozszerzenie zestawu danych doświadczalnych kąta położenia wahadła wykorzystywanego do identyfikacji współczynników modelu siły oporu o dodatkowy zbiór zawierający numerycznie wyznaczone z danych eksperymentalnych wartości prędkości i przyspieszenia wahadła.

W rozdziale ósmym Doktorant przedstawił identyfikację parametrów siły oporu w ruchu przestrzennym wahadła. Sformułował odpowiednie zagadnienie optymalizacji i przedstawił wyniki identyfikacji na podstawie porównania danych eksperymentalnych i wyników symulacji numerycznej.

W rozdziale dziewiątym Autor przedstawił zastosowanie asymptotycznej metody wielu skal czasowych do rozwiązania nieliniowego równania ruchu płaskiego wahadła fizycznego (pierwsza rozważana konstrukcja). Rozważano przypadek z siłą tłumienia opisaną za pomocą sumy oporu proporcjonalnego do prędkości i do kwadratu prędkości. Rozważania ograniczono do przypadku niezbyt dużych kątów wychylenia, przyjmując w rozwinięciu Taylora funkcji sinus dwa pierwsze wyrazy.

W ostatnim, dziesiątym, rozdziale rozprawy przedstawiono podsumowanie, najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań oraz potencjalne kierunki dalszych prac. Opracowanie kończą dodatki A-C oraz wykaz bibliografii zawierający najistotniejsze pozycje dotyczące omawianej problematyki. Jest on reprezentatywny dla tematu rozprawy i zawiera łącznie 102 pozycje.

Ocena merytoryczna rozprawy

Struktura przedłożonej do oceny rozprawy Pana mgr inż. Roberta Salomona jest spójna i logiczna. Przyjęty układ treści oraz tok prowadzenia rozważań zasadniczo odpowiada klasycznemu schematowi pracy doktorskiej w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych.

Problem badawczy ocenianej rozprawy dotyczy doboru odpowiedniego modelu obliczeniowego opisu oporu ruchu ciała sztywnego w ośrodku ciągłym (powietrze, płyn). Integralną częścią postępowania jest też opracowanie metodyki możliwie najdokładniejszego i wiarygodnego oszacowania wartości współczynników w zaproponowanym modelu analitycznym. Pomimo powszechnie stosowanych obecnie modeli rozpraszania energii – najczęściej jako tłumienia wiskotycznego lub modeli tłumienia strukturalnego definiowanego poprzez piątą pochodną (czwartą względem przestrzeni i kolejną względem czasu) przemieszczenia uogólnionego czy też uproszczonych modeli proporcjonalnych stosowanych np. w MES – to jednak problem właściwego opisu zjawisk związanych z szeroko rozumianymi oporami ruchu jest nadal otwarty. Wciąż prowadzone są takie badania, a znaczącą pozycję w tym obszarze zajmują prace nad opracowaniem wiarygodnych modeli tłumienia zewnętrznego wynikającego z oddziaływania pomiędzy strukturą a otaczającym ośrodkiem ciągłym. Prace te dotyczą zarówno konstrukcji podatnych, jak i struktur idealnie sztywnych.

Warto podkreślić, że omawiana problematyka badawcza jest istotna nie tylko z poznawczego punktu widzenia, ale także z uwagi na kluczowe znaczenie praktyczne. W kontekście tych obserwacji można zatem stwierdzić, że podjęta przez Doktoranta tematyka jest bardzo aktualna i dobrze wpisuje się we współczesne trendy rozwoju techniki.

Zawarty w rozdziale pierwszym przegląd literatury przedmiotu pozwolił Autorowi na określenie tezy badawczej przedłożonej rozprawy. Została ona sformułowana następująco: „Proponowane metody eksperymentalnego wyznaczenia parametrów modelu siły oporu ośrodka dają podstawy do szerokiej analizy zachowania układu mechanicznego opartej o realistyczne dane”.

Sformułowana teza badawcza pozwoliła Kandydatowi na odpowiednie określenie zakresu rozprawy. Jako podstawowe zadanie przyjęto zaprojektowanie i wykonanie stanowisk pomiarowych służących do realizacji ruchu płaskiego i ruchu przestrzennego wahadła fizycznego. Zarejestrowane wielkości eksperymentalne miały zostać opracowane z zastosowaniem autorskich algorytmów analizy i przetwarzania danych. Kolejnym zadaniem Doktoranta było zaproponowanie analitycznego modelu opisu oporu ruchu i wykonanie identyfikacji sił tłumienia. Założono, że w zadaniu identyfikacyjnym

zostaną wykorzystane metody optymalizacyjne, a uzyskane wyniki zostaną zweryfikowane przez dodatkowe porównanie rezultatów symulacji numerycznych i wartości pomiarowych. Autor podjął się także wyznaczenia analitycznego rozwiązania równań ruchu wahadła fizycznego z nieliniową siłą oporu bazując na zweryfikowanych we wcześniejszych etapach badań modelach tłumienia.

Oceniając tę część rozprawy należy stwierdzić, że przyjęty przez Doktoranta zakres pracy jest obszerny i w pełni adekwatny do sformułowanej tezy badawczej. Zaproponowane przez Autora metody badawcze są właściwe i wzajemnie komplementarne. Należy podkreślić, że reprezentują one pełne spektrum najważniejszych narzędzi naukowych, tj. realizację eksperymentu i krytyczną ocenę danych pomiarowych, zaproponowanie zaawansowanych modeli matematycznych badanego układu, przeprowadzenie symulacji numerycznych oraz wyznaczenie przybliżonych rozwiązań analitycznych.

W rozdziale drugim rozprawy Autor przedstawił modele sił oporu ośrodka wykorzystane w dalszej części rozprawy. Są to kolejno klasyczny model tłumienia wiskotycznego, model tłumienia wiskotycznego z dodatkowym członem zależnym od kwadratu prędkości oraz model trzeci, najbardziej rozbudowany, zawierający oprócz wymienionych dwu dodatkowy człon inercjalny. Zależności matematyczne siły oporu zostały podane w zapisie wektorowym.

Najistotniejszą część rozprawy stanowią badania własne Doktoranta zawarte w rozdziałach czwartym i kolejnych. W pierwszej kolejności Kandydat wyprowadził dynamiczne równania ruchu wahadła. Rozważano dwa przypadki – tj. ruch płaski wahadła w płaszczyźnie pionowej oraz ruch przestrzenny, w którym górny punkt mocowania wahadła porusza się ruchem po okręgu w płaszczyźnie poziomej. Zależności wyprowadzono korzystając z formalizmu Lagrange'a. Zgodnie z przyjętym planem badawczym Autor przyjął trzy alternatywne modele siły oporu. W efekcie sformułowane zostały trzy wersje równania ruchu wahadła poruszającego się ruchem płaskim. Są to równania nieliniowe z uwagi na ścisłą reprezentację kąta położenia wahadła φ za pomocą funkcji sinus – tzn. nie zastosowano uproszczeń do wartości małych. Dodatkowo w dwu z tych równań występują nieliniowe składniki siły tłumienia. Najbardziej rozbudowane równania ruchu odpowiadające trzeciemu przypadkowi siły oporu Autor sprowadził do postaci bezwymiarowej. Zaproponowano dwie alternatywne formy takiego zapisu – tzn. albo z masą modalną równą wartości jeden (zależność (4.34)), albo z masą modalną zawierającą współczynnik tłumienia inercyjnego w jawnej postaci (zależność (4.37)). Zapisane równania uzupełniono o warunki początkowe. W dalszej kolejności wyprowadzono równania ruchu wahadła w układzie przestrzennym. Wykorzystano w tym celu m.in. zależności transformacyjne pomiędzy lokalnymi układami współrzędnych oraz równania sił oporu wyprowadzone w poprzednim podrozdziale. Otrzymano ostatecznie układ dwu równań różniczkowych kątów położenia wahadła; są to równania nieliniowe wzajemnie sprzężone poprzez funkcje trygonometryczne, jak i prędkości kątowe. Sformułowano także warunki początkowe problemu. W tym celu, z uwagi na niestacjonarność więzów, zastosowano funkcję skokową Heaviside'a i deltę Dirac'a. Należy zaznaczyć, że w odróżnieniu od ruchu płaskiego wahadła, zadanie sformułowania warunków początkowych w założonym

ruchu przestrzennym nie było problemem trywialnym. W końcowej części tego rozdziału Doktorant uprościł wyprowadzone równania dynamiczne do przypadku ruchu ustalonego wahadła. W efekcie otrzymano dwa równania nieliniowe i wzajemnie sprzężone, w których wielkościami niewiadomymi są kąt α_u opisujący odchylenia wahadła od pionu i kąt β_u reprezentujący wyprzedzenie/opóźnienie płaszczyzny wahadła w stosunku do poruszającego się punktu górnego zamocowania.

W rozdziale piątym przedstawiono szczegółowy opis przeprowadzonych doświadczeń laboratoryjnych. Badane wahadła wykonano z pręta aluminiowo-magnezowego o okrągłym przekroju poprzecznym. Wybór takiego rozwiązania jest ze wszech miar uzasadniony, ponieważ poprzez ograniczenie sił bezwładności spodziewane efekty związane z siłami oporu są lepiej widoczne. Ponadto wykorzystanie pręta o przekroju okrągłym eliminuje potencjalne niepożądane efekty związane z brakiem symetrii opływu itp. Celem zapewnienia ogólności rozważań w eksperymentach wykorzystano cztery wahadła różniące się długością. Prawidłowo rozwiązano także zagadnienie wykonania punktu zamocowania wahadła. Jako element łączący wykorzystano bardzo krótkie cięgno i ten sposób zamocowania może być modelowany w rozważaniach analitycznych jako przegub kulisty. Do rejestracji ruchu wahadła wykorzystano kamerę o wysokiej częstotliwości próbkowania sprzężoną z komputerem zapisującym pliki video w rozdzielczości 1024×512 lub 1024×1024 punkty. Wobec przyjętej częstości rejestrowania obrazu 250 Hz i założonych rozdzielczości obrazu rejestrowano odpowiednio 12 bądź 6 sekund ruchu układu. Czasy te odpowiadały maksymalnie 20 cyklom ruchu krótkiego wahadła, co jest wartością jak najbardziej wystarczającą. Niestety, w przypadku długich prętów i dużego kąta wychylenia początkowego czas rejestracji 6 sekund pozwalał na zapisanie jedynie 5–6 okresów. Wartość ta wydaje się być nieco za mała, szczególnie wobec dużych rozbieżności wyników doświadczalnych i numerycznych obserwowanych właśnie w położeniach zwrotnych wahadła.

W drugim doświadczeniu pręt wahadła został przymocowany do tarczy obracającej się w płaszczyźnie poziomej i napędzanej silnikiem krokowym sterowanym za pomocą platformy prototypowania Arduino. Doktorant opracował własny program komputerowy do sterowania prędkością obrotową tarczy w taki sposób, aby osiągnąć wymaganą prędkość kątową w zadanym czasie. Ruch układu mechanicznego był rejestrowany za pomocą zestawu sześciu kamer systemu BTS SMART o maksymalnej częstotliwości próbkowania 500 Hz i rozdzielczości 2048×2048 punktów. Dokładność identyfikacji położenia śladowych punktów charakterystycznych wynosiła poniżej 0,1 mm i jest to wartość w zupełności wystarczająca. Badany układ był zamontowany na ramie, na której umieszczono dodatkowy marker kontrolny do oceny drgań posadowienia platformy badawczej.

W omawianym rozdziale piątym opisano także procedury przetwarzania danych pomiarowych. Wynikało to z konieczności wyznaczenia położenia punktu mocowania wahadła w pierwszym eksperymencie, gdyż kalibracja taka nie była wykonywana automatycznie przez oprogramowanie rejestrujące. W tym celu Doktorant zdefiniował funkcję celu minimalizującą całkowity błąd dopasowania zmierzonych współrzędnych do równania okręgu. Ponadto, w przypadku ruchu wahadła w układzie

przestrzennym, obliczono poprawki do danych pomiarowych. W tym celu rozwinięto w szereg Taylora zależności na poszczególne współrzędne markerów wahadła. Wyznaczone wartości poprawek zostały uwzględnione w ostatecznych wynikach pomiarów przyjętych do dalszych analiz.

Oceniając tę część rozprawy należy stwierdzić, że eksperymenty zostały zaplanowane i przeprowadzone prawidłowo. Wykorzystano nowoczesną aparaturę badawczą o wystarczającej precyzji pomiaru i częstości próbkowania. Uzyskane dane pomiarowe zostały poddane niezbędnemu przetworzeniu do potrzeb dalszych badań.

W rozdziale szóstym rozprawy Autor przeprowadził identyfikację parametrów siły oporu w ruchu płaskim wahadła rozpatrując kolejno wszystkie trzy zaproponowane modele analityczne tej siły. Dane doświadczalne zostały zestawione z wynikami numerycznego całkowania równań ruchu zawierającymi poszukiwane wartości współczynników siły tłumienia. Rozwiązania numeryczne uzyskano stosując funkcję `NDSolve` komercyjnego systemu obliczeń symbolicznych i numerycznych `Mathematica`. Doktorant zdefiniował funkcje będące miarą rozbieżności między rozwiązaniem numerycznym a danymi eksperymentalnymi. Funkcje były obliczane zarówno indywidualnie dla każdej wartości kąta początkowego wychylenia wahadła i jego długości, jak również i łącznie dla wszystkich położań początkowych konkretnego wahadła. Dodatkowo obliczono współczynnik korelacji Pearsona pozwalający na statystyczną ocenę liniowej zależności między dwiema zmiennymi.

Do identyfikacji parametru podstawowego modelu siły tłumienia (tj. modelu wiskotycznego) zastosowano metodę bisekcji oraz porównawczo metodę gradientową. Przyjęto przy tym, racjonalne w tym kontekście, założenie o wypukłości funkcji celu w dziedzinie poszukiwań i istnieniu w związku z tym ścisłego jej ekstremum. Porównując wyniki identyfikacji z każdego z 16 przeprowadzonych eksperymentów zauważono, że otrzymane wartości charakteryzowały się dość dużą rozbieżnością. W efekcie wystąpiła duża różnica między wartościami eksperymentalnymi kąta wychylenia wahadła, a wartościami wyznaczonymi numerycznie. W niektórych przypadkach różnice te sięgały blisko 10° . Komentując te wyniki Autor słusznie zauważył, że rozbieżności te wynikają z wyraźnie widocznego przesunięcia fazowego między wyznaczonymi przebiegami czasowymi.

Analogicznie do powyższego przypadku przeprowadzono identyfikację parametrów modelu siły oporu zawierającego dodatkowy człon kwadratowy. Uzyskano optymalne wartości współczynników tłumienia, przy czym wartość jednego z nich okazała się być ujemna. Doktorant słusznie zidentyfikował to rozwiązanie jako niefizyczne. Ze względów jedynie poznawczych porównano eksperymentalne przebiegi czasowe dla poszczególnych konfiguracji początkowych wahadeł z wynikami otrzymanymi przez numeryczne rozwiązanie równania ruchu z optymalnymi współczynnikami modelu, w tym z ujemnym współczynnikiem tłumienia wiskotycznego. Zauważono, że problem niedopasowania wartości ekstremalnych wychyleń wahadła praktycznie nie wystąpił. Wniosek ten był dla Doktoranta przesłanką potwierdzającą zasadność uwzględnienia członu nieliniowego siły tłumienia, choć jednocześnie wskazującą nadal niepełną kompletność takiego opisu. W końcowej części tego rozdziału

Autor przedstawił wyniki identyfikacji trzeciego modelu oporu – tj. modelu uwzględniającego dodatkowo składnik bezwładnościowy. Uzyskane wartości funkcji celu wskazały, że model ten stanowi najlepsze z przebadanych dopasowanie do rzeczywistości i jednocześnie nie prowadzi do wyników niefizycznych. Zaprezentowane porównania rozwiązania numerycznego z wynikami eksperymentalnymi w postaci przebiegów czasowych kąta wychylenia $\varphi(t)$ potwierdziły dobrą zgodność wartości amplitud oraz fazy ruchu.

Bardzo istotną część rozprawy stanowi rozdział 7 opracowania. Zawiera on wyniki identyfikacji najbardziej rozbudowanego modelu siły oporu ośrodka w ruchu płaskim na podstawie rozszerzonego zestawu danych eksperymentalnych. Doktorant słusznie zauważył, że zarejestrowane wartości kąta położenia $\varphi(t)$ są obarczone pewnym błędem pomiarowym, w związku z tym dopasowywanie wartości współczynników tłumienia do tych danych nie gwarantuje całkowicie wiarygodnych rezultatów. W związku z powyższym zaproponowano alternatywne podejście do zagadnienia identyfikacji. Polegało ono na numerycznym wyznaczeniu na podstawie danych pomiarowych chwilowych wartości prędkości i przyspieszenia stycznego wahadła. Tak utworzony rozszerzony zbiór danych wejściowych stanowił zbiór porównawczy dla wyników numerycznego rozwiązania równań ruchu. Do wyznaczenia dyskretnych wartości prędkości i przyspieszenia wykorzystano wielopunktowe schematy różnicowe. W szczególności testowano interpolacyjną metodę współczynników nieoznaczonych (centralny schemat różnicowy) oraz aproksymacyjny schemat różnicowy estymujący zarówno wartości pierwszej i drugiej pochodnej, jak również wygładzający wartości bezpośrednich pomiarów. Na podstawie wybranego przykładu w postaci funkcji sinus Doktorant wykazał zdecydowaną przewagę tej drugiej procedury. W związku z tym sformułowano funkcję celu poszukiwania wartości trzech współczynników siły oporu, które minimalizują różnicę między rozwiązaniem numerycznym i wartościami eksperymentalnymi bazując na dziedzinie określonej przez zbiór poprawionych wartości kąta położenia, oraz prędkości i przyspieszenia stycznego we wszystkich zarejestrowanych chwilach czasu. Sformułowano warunki konieczne istnienia ekstremum w postaci układu trzech równań algebraicznych i na tej podstawie wyznaczono wartości współczynników tłumienia dla każdego wariantu wahadła (tj. długości l). Uzyskane wyniki uzupełniono o analizę błędów metodą regresji. Ostatecznie otrzymano wartości bezwymiarowych współczynników tłumienia i przyporządkowane im przedziały ufności. Analizując uzyskane wyniki Doktorant słusznie zauważył, że wartości wszystkich współczynników trójparametrowego modelu siły oporu wyznaczone metodą gradientową we wcześniejszych etapach badań, należą do wyznaczonych w tej części rozprawy przedziałów zmienności.

W ocenie recenzenta rozdział ten jest istotnym własnym osiągnięciem Doktoranta. Wykorzystano bowiem rozbudowany aparat matematyczny do estymacji nie mierzonych bezpośrednio w eksperymencie wartości prędkości i przyspieszeń kątowych. Dodatkowo wybrany schemat różnicowy umożliwił wygładzenie danych bezpośredniego pomiaru kąta chwilowego położenia wahadła. Przeprowadzono także niezbędną analizę statystyczną uzyskanych wyników. Słuszność tych rozważań potwierdziła zgodność uzyskanych ostatecznie przedziałów wartości współczynników tłumienia z wyznaczonymi

wcześniej rozwiązaniami. Powyższe obserwacje pozwalają stwierdzić, że Doktorant potrafi interpretować i analizować w sposób krytyczny otrzymane wyniki badań zarówno doświadczalnych jak i badań numerycznych. Kandydat potrafi także prawidłowo i w sposób syntetyczny formułować wnioski z prowadzonych analiz.

Rozważania jakie były przedstawione w rozdziale siódmym powtórzono w kolejnej części rozprawy analizując ruch przestrzenny wahadła (eksperyment numer 2). Uzyskane wyniki wskazały na bardzo dużą czułość procedury identyfikacji siły tłumienia w ruchu przestrzennym. Doktorant słusznie zauważył, że istotny wpływ na to miały stosunkowo mało dokładny pomiar pozycji markerów na wahadle, względnie duża prędkość ruchu obrotowego tarczy oraz dodatkowo drgania ramy wspierającej badany układ. Nie mniej ważnym spostrzeżeniem Autora jest wniosek, że warunki ruchu ustalonego nie dostarczają możliwie pełnych danych opisujących dynamikę wahadła. Zabrakło jednak dalszego rozwinięcia tej myśli. W ocenie recenzenta przyczyną tego faktu jest brak zmienności w czasie położenia kątowych pręta, i w związku z tym brak możliwości analizowania w porównaniach okresu takich zmian. Alternatywą byłoby śledzenie drgań w okresie przejściowym, jednak analizy tego typu są bardzo trudne. W tym miejscu należy również dodać, że wyprowadzone w rozdziale czwartym dynamiczne równania ruchu przestrzennego wahadła są silnie nieliniowe i dodatkowo wzajemnie sprzężone. W związku z tym ich numeryczne rozwiązanie może być bardzo poważnym wyzwaniem.

W ostatnim numerowanym rozdziale rozprawy Doktorant podjął próbę wyznaczenia przybliżonych rozwiązań analitycznych równań ruchu płaskiego wahadła z siłą oporu opisaną za pomocą sumy wyrazów liniowego i kwadratowego prędkości. Do rozwiązania zagadnienia zastosowano perturbacyjną metodę wielu skal czasowych. Zdaniem oceniającego wybór ten nie jest korzystny z uwagi na występowanie w równaniach funkcji wartości bezwzględnej. Zdaniem oceniającego można było skorzystać np. z metody bilansu harmonicznych. Szerszy komentarz do tej części pracy zawarto w uwagach krytycznych do rozprawy.

Pytania i uwagi szczegółowe do pracy

Lektura pracy nasuwa kilka pytań i wątpliwości wymagających wyjaśnienia przez Autora.

1. Na stronie 22 podano: „... autor rozwiązał za pomocą metody wielu skal w dziedzinie czasu dwuwymiarowe zagadnienie ruchu wahadła fizycznego”. Wydaje się, że użycie w tym kontekście słowa „dwuwymiarowe” nie jest najszcześniejsze. Zadanie jest jednowymiarowe w sensie matematycznym, bo występuje jedna zmienna uogólniona.
2. Na stronie 30 podano: „... względem nieruchomego układu odniesienia”. Ściśle rzecz biorąc, nie musi to być układ nieruchomy; może to być dowolny układ inercjalny.
3. W zależnościach (4.7)–(4.9) podanych na stronie 32 pomyłono funkcje trygonometryczne – ewentualnie zamiennie powinny być oznaczone osie na rysunku 4.2.

4. Opis badania dynamiki wahadła w ruchu przestrzennym (strona 52 i dalej). Jak konkretnie dobierano czas rozbiegu tarczy i osiągnięcia ruchu ustalonego wahadła? Jak dokładnie weryfikowano fakt, że stan ten faktycznie osiągnięto? Jakie przyjęto w tym celu kryterium?
5. Czy tarcza, do której było mocowane wahadło była dodatkowo wyważana np. przeciwwagą – dodana masa wahadła mogła skutkować niepożądanymi drganiami przenoszonymi na ramię. Proszę również wyjaśnić dlaczego dodatkowy marker kontrolny był umieszczony na wysięgniku, a nie bezpośrednio na ramie. Można sobie wyobrazić sytuację, że przy pewnej częstotliwości wymuszenia (ruchu obrotowego tarczy) będą powstawać drgania lokalne giętne samego wysięgnika, nieistotne dla samej ramy. Czy w tej sytuacji należałoby przerwać pomiary?
6. Jakie było zastosowanie czerwonego markera znajdującego się w górnej części wahadła przedstawionego na rysunku 5.10?
7. Na stronie 64 podano, że suwmiarką zmierzono odległość od punktu zawieszenia wahadła do środka markera d_{SA} . Pomiar ten jest mało dokładny, gdyż był to pomiar do środka obszaru śledzonego przez kamerę; nie był to konkretnie wyróżniony punkt - np. kropką.
8. Tytuł rozdziału nr 6: „... modelów siły” → „modeli siły”
9. W rozdziale 6 podano, że do wyznaczenia rozwiązań numerycznych równań ruchu stosowano procedurę `NDSolve` z pakietu oprogramowania Mathematica. Czy testowano alternatywnie też i inne procedury całkowania numerycznego? Różne metody całkowania mogą dawać nieco odmienne wyniki.
10. Pewne wątpliwości recenzenta budzi bezpośrednie porównywanie wyników wartości współczynników tłumienia prezentowanych w rozdziale 6 uzyskiwanych z różnych przebiegów czasowych. Jak podano we wcześniejszej części rozprawy przy krótkich wahadłach i małych wychyleniach początkowych system rejestracji danych pozwalał na zapis 12 sekund ruchu, w przypadku dłuższych wahadeł i większych kątów było to 6 sek. Różnica ta skutkowała oczywiście mniejszą liczbą zarejestrowanych okresów drgań. A ponieważ największe rozbieżności wyników pojawiały się w położeniach zwrotnych wahadła wydaje się, że właśnie przebiegi z większą liczbą okresów stanowią lepszą bazę porównawczą. Fakt ten należało ewentualnie jakoś skomentować w rozprawie.
11. Na stronie 75 podano „... największe różnice pomiędzy rozwiązaniami numerycznymi a wynikami doświadczalnymi otrzymano dla $k = 2$, a najmniejsze dla $k = 4$ ”. Wyniki zamieszczone w Tabeli 6.3 wskazują, że to przypadek $k = 3$ ma najmniejszą wartość funkcji celu.
12. Strona 82 „... znalezieniu funkcji aproksymującej, która minimalizuje pewną funkcję...” – raczej chodziło o minimalizację wartości funkcjonału a nie funkcji.
13. W rozdziale 9 przedstawiono przybliżone rozwiązanie analityczne zagadnienia ruchu płaskiego wyznaczone metodą wielu skal czasowych. Doktorant założył rozwinięcie do drugiego rzędu

przybliżenia (wzór (9.16)), co oznacza wprowadzenie trzech skal czasowych τ_0 , τ_1 i τ_2 . Tymczasem w zapisie pochodnych po czasie bezwymiarowym τ zależności (9.17) i (9.18) występują jedynie dwie skale czasu. Konsekwencją przyjęcia trzech skal czasu powinien być także fakt, że amplitudy rozwiązania problemu pierwszego rzędu przybliżenia (wzór (9.24)) powinny zależeć i od czasu τ_1 i od czasu τ_2 . Ma to swoje konsekwencje w dalszej części tego rozdziału. Proszę o wyczerpujące wyjaśnienie tych wątpliwości.

14. Prędkość kątowna w obowiązującym układzie SI ma ściśle przyporządkowaną jednostkę i jest to rad/sek. Wielokrotnie w rozprawie wartość tego parametru jest podawana w obr/sek, co jest niepoprawne. Jeśli konieczne (a nawet wygodne dla piszącego i dla czytelnika) było podawanie wartości w tych jednostkach, to należało w tych miejscach operować ogólnym pojęciem prędkości.

15. W kilku miejscach natrafiono na bardzo drobne błędy w zapisie zależności matematycznych. Listę zauważonych usterek pozwalam sobie zamieścić poniżej:

- We wzorze (4.20) brakuje pochodnej czasowej w drugim czynniku wyrazu nieliniowego.
- We wzorze (4.38) brakuje indeksu dolnego „2” w mianowniku zależności na p_1 .
- We wzorach (4.67)₂ i ()₃ po lewej stronie są błędne indeksy dolne; winno być a_y^\perp i a_z^\perp .
- We wzorze (5.8) po lewej stronie brak nawiasu zamykającego.

Ocena redakcyjna i edycyjna pracy

Praca jest bardzo starannie przygotowana pod względem językowym i edycyjnym. Styl Autora i sposób wypowiedzi są precyzyjne i zrozumiałe dla czytelnika. Zachowany jest logiczny ciąg rozumowania i wnioskowania, a zdania są formułowane w sposób zwięzły i spójny. Autor poprawnie stosuje słownictwo i terminologię fachową.

Również bardzo wysoko oceniam stronę edytorską rozprawy – skład i przygotowanie tekstu nie budzi najmniejszych zastrzeżeń. Wszystkie tabele, rysunki, wzory i zależności matematyczne zostały ponumerowane i są właściwie przywoływane w tekście rozprawy. Zwraca uwagę również pełna spójność prezentowania rozważań matematycznych i zamieszczanie etapów pośrednich wykonywanych przekształceń. Podejście takie bardzo ułatwia czytelnikowi śledzenie wywodu. W trakcie czytania rozprawy natrafiono tylko na pojedyncze, marginalne błędy w zapisie matematycznym, co wobec bardzo dużej liczby wprowadzonych wzorów i zależności jest wynikiem doskonałym i potwierdza bardzo duży wysiłek Autora włożony w jak najlepsze przygotowanie rozprawy.

Zauważono natomiast pewną niekonsekwencję w zapisie wielkości dziesiętnych. Obliczane wielkości czy też wyniki pomiarów podawane są z różną dokładnością – raz są to dwa miejsca po przecinku, raz trzy lub cztery. Należało ujednoczyć formalizm zapisu.

Tabele i ilustracje są czytelne i wysokiej jakości. Każda z nich została odpowiednio wyróżniona i dobrze podpisana. Zauważono natomiast na kilku wykresach, np. przebiegów czasowych w rozdziale 7 i innych, brak oznaczeń jednostek na osiach.

Załączony na początku wykaz najważniejszych oznaczeń jest istotnym ułatwieniem dla czytelnika, przede wszystkim z uwagi na mnogość zastosowanych wielkości fizycznych i często bardzo podobnych oznaczeń literowych.

Wykaz literatury jest przygotowany właściwie i z zachowaniem wysokich standardów prac naukowych. Wszystkie wyszczególnione w nim pozycje są przytaczane w tekście rozprawy.

Najważniejsze osiągnięcia pracy

Podsumowując wykonaną opinię za najistotniejsze osiągnięcia Doktoranta należy uznać:

- Wyprowadzenie dynamicznych równań ruchu wahadła w ruchu płaskim i w ruchu przestrzennym zawierających ogólną postać sił oporu ośrodka. Istotnym osiągnięciem jest również sformułowanie warunków początkowych ruchu wahadła z węzami niestacjonarnymi; zadanie to wymagało użycia funkcji nieciągłych i rachunku impulsów.
- Ogólne sformułowanie uproszczonego modelu siły oporu ośrodka ze składnikami opisującymi dyssypację energii mechanicznej oraz dodatkowym składnikiem inercyjnym.
- Przeprowadzenie analizy porównawczej przydatności aproksymacyjnych i interpolacyjnych wielowęzłowych schematów różnicowych do przetwarzania danych pomiarowych oraz wyznaczania wartości pochodnych.
- Wykonanie statystycznej oceny wartości estymowanych parametrów przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów do minimalizacji błędów spełnienia równań ruchu poprzez porównanie wartości zarówno położenia kąтового, jak również i chwilowych wartości prędkości i przyspieszeń.

Podsumowanie

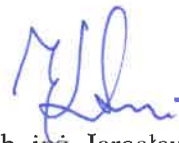
Jako końcowe wnioski z przedłożonej opinii mogę stwierdzić, że:

1. Przedstawiona w ocenianej rozprawie tematyka badawcza, sformułowane cele oraz treść opracowania mieszczą się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i obejmują zagadnienia związane z dyscypliną inżynieria mechaniczna.
2. Materiał zawarty w pracy w pełni odpowiada podanemu na początku zakresowi opracowania. Sformułowana teza badawcza została dobrze udokumentowana. Również tytuł przedłożonej do oceny dysertacji został właściwie sformułowany i dobrze oddaje jej zawartość.

3. Kandydat wykazał się umiejętnościami zaplanowania i przeprowadzenia eksperymentu, umiejętnościami modelowania matematycznego badanych układów mechanicznych, a także znajomością metod numerycznych i przybliżonych metod analitycznych rozwiązywania nieliniowych równań różniczkowych ruchu. Tym samym Doktorant potwierdził dobrą znajomość wszystkich najważniejszych naukowych narzędzi badawczych.
4. Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera samodzielne i oryginalne rozwiązania problemu naukowego. Potwierdza to kompetencje Autora do prowadzenia samodzielnej pracy badawczej.

W związku z powyższym uważam, że oceniana rozprawa Pana mgr. inż. Roberta Salomona pt. „Identyfikacja parametrów i weryfikacja doświadczalna modelu matematycznego wybranych nieliniowych układów mechanicznych” (promotor dr hab. inż. Grażyna Sypniewska-Kamińska prof. PP, promotor pomocniczy dr inż. Paweł Fritzkowski) *spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim* w myśl ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Tym samym wnioskuję o dopuszczenie do dalszego procedowania w postępowaniu.

Ponadto, biorąc pod uwagę kompleksowy zakres przedstawionych badań, a także wspomnianą wszechstronną i pogłębioną znajomość zróżnicowanych narzędzi badawczych potwierdzającą wysokie kompetencje naukowe Kandydata uważam, że przedłożona rozprawa doktorska zasługuje na wyróżnienie.



dr hab. inż. Jarosław Latański, prof. PL