

**Opinia promotora o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Roberta Salamona  
pt. Identyfikacja parametrów i weryfikacja doświadczalna modelu matematycznego wy-  
branych nieliniowych układów mechanicznych**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Roberta Salamona dotyczy doświadczalnej weryfikacji kilku modeli matematycznych siły oporu powietrza występującej w ruchu układów mechanicznych oraz identyfikacji wartości parametrów tych modeli. Aspekt wpływu ośrodka gazowego na ruch układów mechanicznych, często jest albo pomijany, albo ujmowany w ramach modelu tłumienia wiskotycznego, który opisuje całościowo różnorodne efekty dyssypacji energii mechanicznej w układzie. W ogólności modele tłumienia opisują zależności między wartością siły oporu a wielkościami kinematycznymi takimi jak: prędkość, przyspieszenie, prędkość odkształcenia. Doktorant zaproponował trójparametrowy model siły oporu ośrodka z proporcjonalnymi do prędkości i jej kwadratu składnikami opisującymi dyssypację energii mechanicznej oraz składnikiem proporcjonalnym do przyspieszenia przedstawiającym efekt masy dodanej oraz modele zredukowane do jednego i dwóch składników dyssypacyjnych. Siła proporcjonalna do przyspieszenia, nazywana także siłą inercjalną, jest stosowana w hydrodynamice przy modelowaniu działania cieczy na ciała stałe poruszające się ruchem przyspieszonym, na przykład na skutek oscylacji. Siła ta, powodująca pozorny efekt zwiększenia masy czy szerszej bezwładności ciał, jest pomijana w modelowaniu wpływu powietrza na ruch elementów układów mechanicznych.

Praca ma charakter eksperymentalny i teoretyczny. Doktorant zaplanował i przeprowadził stosunkowo proste eksperymenty polegające na rejestracji ruchu jednorodnego prostoliniowego pręta. W wariancie pierwszym pręt zawieszony w nieruchomym punkcie wykonuje drgania w pionowej płaszczyźnie wokół stabilnego położenia równowagi. W wariancie drugim pręt, zachowujący się jak fizyczne wahadło przestrzenne, został zawieszony za pomocą przegubu na kołowej tarczy obracającej się wokół pionowej osi. Rejestracja ruchu w pierwszym przypadku została przeprowadzona za pomocą kamery o wysokiej częstotliwości obrazowania, a w drugim za pomocą profesjonalnego systemu BTS służącego do analizy ruchu, przy czym rejestrację przeprowadzono w stanie ustalonym. Warto podkreślić, że Doktorant wykonał samodzielnie niezbędne elementy obu stanowisk pomiarowych i zaprojektował układ sterujący silnikiem krokowym napędzającym tarczę. Na część teoretyczną składa się modelowanie ruchu obu układów traktowanych jako układy dyskretne, opracowanie algorytmów służących do przetwarzania zebranych danych pomiarowych, sformułowanie zagadnień optymalizacji mającej na celu estymowanie wartości parametrów rozpatrywanych modeli siły oporu, ocena statystyczna otrzymanych wyników, wnioskowanie oraz zastosowanie modelu trójparametrowego, który okazał się najlepszym z badanych, do wyprowadzenia rozwiązania dwuwymiarowego zagadnienia ruchu wahadła fizycznego metodą wielu skal w dziedzinie czasu (MMS). Metoda ta należy do grupy metod asymptotycznych i jest przybliżoną metodą analityczną.

Istota identyfikacji wartości parametrów modelu, z matematycznego punktu widzenia, polega na minimalizacji funkcji celu, będącej miarą różnicy między danymi eksperymentalnymi i wynikami, które otrzymuje się numerycznie, rozwiązując równania ruchu z zaimplementowanym modelem siły oporu i zmieniając wartości nieznanych współczynników zgodnie z algorytmem metody optymalizacyjnej. Zagadnienie estymacji wartości współczynników modelu siły oporu należy do zagadnień odwrotnych dynamiki. Opis ruchu, w tym przypadku dyskretnego układu mechanicznego, w sformułowaniu odwrotnym jest niekompletny. Wartości parametrów, niezbędne do jednoznacznego sformułowania modelu matematycznego ruchu, wyznaczone są na podstawie zmierzonej odpowiedzi układu, przy zastosowaniu metod optymalizacyjnych. Jedną z cech problemów odwrotnych jest ich wysoka czułość na błędy pomiarowe. Błędy rejestracji ruchu przeprowadzonej za pomocą systemu BTS, których powtarzając eksperyment nie udało się wyeliminować z uwagi na pewne nieusuwalne ograniczenia, spowodowały, że wyników estymacji współczynników modelu siły oporu nie można było uznać za wiarygodne. Z tego powodu Doktorant w rozdziale ósmym rozprawy opisał symulację numeryczną tego eksperymentu i na jej podstawie sformułował wnioski, także dotyczące możliwości przeprowadzenia eksperymentu z pozytywnym skutkiem w swoich dalszych badaniach. Natomiast eksperyment, który Doktorant przeprowadził dla modelu dwuwymiarowego ruchu wahadła, pozwolił nie tylko wyznaczyć wartości współczynników badanych modeli, ale także, przy zmodyfikowanym sformułowaniu zagadnienia optymalizacji, dokonać ich oceny statystycznej w ramach estymacji przedziałowej. Na podstawie otrzymanych wyników Doktorant wyprowadził wniosek, że model z trzema składnikami siły oporu jest najlepszym wyborem spośród badanych wariantów, gdyż nie tylko daje najmniejsze wartości minimalizowanej funkcji celu, ale rozwiązania numeryczne równań ruchu otrzymane dla tego modelu są w wysokim stopniu zgodne z przebiegiem czasowym zmierzonej odpowiedzi układu. Okazało się również, że składnik siły oporu proporcjonalny do przyspieszenia, nieuwzględniany w literaturze w modelowaniu wpływu powietrza na ruch układu, wpływa w sposób zauważalny na częstość drgań własnych. Z tego powodu model trójparametrowy może być uznany za uproszczony model oddziaływania ośrodka gazowego na układy mechaniczne poruszające się ruchem zmiennym, opisujący efekty tego oddziaływania w stopniu znacznie bardziej zgodnym z realnymi warunkami pracy niż częściej stosowane modele wyłącznie dyssypatywne.

Pan mgr inż. Robert Salamon zrealizował cele swojej rozprawy doktorskiej. Istotnym i wymiernym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie metodyki estymacji współczynników trójparametrowego modelu siły oporu ośrodka, w którym porusza się układ mechaniczny. Przy niewielkiej modyfikacji zaprojektowanych stanowisk pomiarowych, może być ona stosowana do badania innych układów mechanicznych. Metodyka ta w swojej części teoretycznej składa się z klasycznych i znanych z literatury modeli, metod i algorytmów, które w sposób autorski zostały przez Doktoranta połączone w jedno kompleksowe narzędzie służące określonymu celowi. Warty odnotowania elementami są wyprowadzone z formalizmu Lagrange'a równania ruchu obu układów z siłami uogólnionymi opisującymi oddziaływanie ośrodka i wyrażonymi przez analitycznie obliczone całki, warunki początkowe dla układu z więzami niestacjonarnymi, sformułowane na podstawie rachunku impulsów, analiza porównawcza przydatności aproksymacyjnych i interpolacyjnych schematów różnicowych do przetwarzania danych pomiarowych, statystyczna ocena wartości estymowanych parametrów przeprowadzona przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów.

Doktorant ukończył studia stacjonarne I i II stopnia na kierunku *Matematyka/Modelowanie Matematyczne* oraz studia niestacjonarne I stopnia na kierunku *Mechatronika/Konstrukcje Mechatroniczne*. Jest współautorem pięciu publikacji, wyniki swoich badań prezentował na trzech konferencjach naukowych, brał udział w czterech projektach badawczych. Wyrażam opinię, uzasadnioną moimi doświadczeniami ze współpracy z Doktorantem, że w perspektywie dalszej pracy naukowej Pan Robert

Salamon będzie rozwijał i twórczo stosował zarówno podejście teoretyczne, jak i eksperymentalne, do czego doskonale przygotowały go studia na obu kierunkach.

Podsumowując, oświadczam, że przyjęłam rozprawę doktorską przygotowaną przez Pana Roberta Salamona, oceniam jej pozytywnie i stwierdzam, że złożona praca spełnia wszystkie kryteria stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z obowiązującym stanem prawnym. Proszę zatem Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Grażyna Gopniewska - Szumińska*

dr inż. Paweł Fritzkowski  
Instytut Mechaniki Stosowanej  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
Politechnika Poznańska

**OPINIA**  
**promotora pomocniczego**  
**o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Roberta Salamona**  
**pt. *Identyfikacja parametrów i weryfikacja doświadczalna modelu matematycznego***  
***wybranych nieliniowych układów mechanicznych***

Rozprawa doktorska mgr. inż. Roberta Salamona dotyczy modelowania sił tłumienia zewnętrznego (oporu powietrza) oraz estymacji parametrów przyjętych modeli na podstawie danych eksperymentalnych. Badania zawężono do dwóch układów geometrycznie nieliniowych: wahadła fizycznego poruszającego się w jednej płaszczyźnie oraz wahadła przestrzennego z ruchomym punktem zawieszenia. Należy podkreślić, że realistyczny opis matematyczny szeroko rozumianej dyssypacji energii w układach mechanicznych stanowi jeden z najbardziej zaawansowanych i skomplikowanych problemów dynamiki. W przypadku oporu powietrza zazwyczaj stosuje się elementarne, bardzo proste modele tłumienia, które w niewielkim stopniu odpowiadają temu konkretnemu mechanizmowi dyssypacji, albo dla uproszczenia wpływ sił oporu na ruch badanych układów pomija się zupełnie. Z tego względu tematyka podjęta przez Doktoranta ma istotne znaczenie zarówno poznawcze, jak i aplikacyjne.

Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny. Autor przygotował dwa stanowiska badawcze i przeprowadził rejestrację ruchu obu wahadeł. W eksperymentach tych korzystał z tzw. szybkiej kamery oraz ze specjalistycznego systemu BTS. Zebrane dane pomiarowe zostały odpowiednio przetworzone, a następnie posłużyły za bazę do estymacji wartości współczynników oporu ośrodka. W części teoretycznej równania ruchu badanych układów wyprowadzono na gruncie mechaniki analitycznej, z zastosowaniem formalizmu Lagrange'a. Doktorant zaproponował trójparametrowy model siły oporu. Aby oszacować wartości tych parametrów, sformułował zagadnienia optymalizacji oraz rozwiązał je przy użyciu rozmaitych metod numerycznych. Ponadto Autor dokonał statystycznej oceny otrzymanych wyników. Dodatkowo, dla wahadła poruszającego się w jednej płaszczyźnie, wyznaczył przybliżone rozwiązanie zagadnienia ruchu za pomocą metody wielu skal w dziedzinie czasu.

Pan mgr inż. Robert Salamon przeprowadził badania naukowe w pełnym zakresie oraz zrealizował założone cele. Wykazał się przy tym dużą samodzielnością, pomysłowością, jak również umiejętnością rozwiązywania złożonych problemów teoretycznych i praktycznych. Ta teoretyczno-inżynierska dwoistość odzwierciedla zresztą wykształcenie Doktoranta w obszarze matematyki i mechatroniki.

Jak już wspomniano, matematyczne ujęcie dyssypacji energii mechanicznej w komputerowych symulacjach ruchu rzeczywistych układów stanowi duże wyzwanie. Ponadto estymacja parametrów modelu jest zagadnieniem odwrotnym dynamiki, co znacznie komplikuje badania symulacyjne. Autor rozprawy przyjął pozornie prosty model siły oporu ośrodka, będący kombinacją znanych z literatury, klasycznych modeli. Jednak to właśnie ta kombinacja oraz jej systematyczne przebadanie w odniesieniu do konkretnych układów pozwoliły otrzymać satysfakcjonującą zgodność wyników numerycznych z eksperymentalnymi. W szczególności istotne znaczenie ma – niespotykany w publikacjach dotyczących symulacji ruchu z uwzględnieniem oporów powietrza – składnik proporcjonalny do przyspieszenia ciała, wywodzący się z hydrodynamiki. Jak wskazują rezultaty opisanych badań, wydaje się on nieodzownym składnikiem modelu tłumienia zewnętrznego w analizowanych przypadkach. Trafność wyboru tak specyficznych układów mechanicznych, jakimi są wahadła, może również budzić pewne wątpliwości. Niemniej jednak od dekad



różnego typu wahadła – jako stosunkowo proste układy o złożonej, nieliniowej naturze – stanowią wartościowy i wdzięczny obiekt badań naukowych (np. w robotyce czy biomechanice). Uważam, że obrona przez Doktoranta ścieżka, tj. wnikliwe i obliczeniowo wyrafinowane badania nad stosunkowo prostym modelem na przykładzie możliwie prostych układów mechanicznych, jest ścieżką jak najbardziej właściwą i skuteczną.

Podsumowując, stwierdzam, że opiniowana praca doktorska jest kompletna w takim sensie, że obejmuje badania teoretyczne, eksperymentalne i – stanowiące swoisty pomost między nimi – badania symulacyjne. Pozytywnie oceniam zarówno samą rozprawę, jak i dojrzałość naukową jej Autora. Uważam, że praca mgr. inż. Roberta Salamona spełnia wszystkie kryteria stawiane rozprawom doktorskim.

P. Firtkowski