

Prof. dr hab. inż. Bogdan SAPIŃSKI
Katedra Automatyzacji Procesów
Akademia Górniczo-Hutnicza
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
deep@agh.edu.pl

Kraków, 06.06.2008.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Grzegorza MIKUŁOWSKIEGO**

pt.

Adaptive impact absorbers based on magnetorheological fluids

Promotor: prof. dr hab. inż. **Jan HOLNICKI-SZULC**

1. Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem opracowano na podstawie zlecenia Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Polskiej Akademii Nauk z dnia 01.04.2008.

Podstawę do przygotowania rozprawy mgr inż. G. MIKUŁOWSKIEGO stanowił projekt badawczy pt. „Adaptive Landing Gears for Improved Impact Absorption” (ADLAND) wykonywany w latach 2003–2006, w ramach 6-tego Programu UE przez konsorcjum 8 ośrodków naukowo-badawczych. Celem tego projektu było zbadanie możliwości wprowadzenia różnego typu adaptacyjnych (semiaktywnych) absorberów energii uderzeń nazywanych AIAs (adaptive impact absorbers) w klasycznych podwoziach samolotów, aby na tej podstawie ocenić, czy realnym jest wykonanie adaptacyjnej wersji takiego podwozia dla lotnictwa cywilnego nazywanej ALG (adaptive landing gear). Jedną z kluczowych metod rozwiązania tego problemu w realizowanym projekcie było zastosowanie absorbera z cieczą magnetoreologiczną (MR) oraz zaprojektowanie, wykonanie i zbadanie odpowiedniego układu sterowania. Doktorant uczestniczył w badaniach prowadzonych na rzecz tego projektu, czego udokumentowaniem są między innymi współautorskie publikacje, w tym 2 w czasopiśmie z listy filadelfijskiej, 1 w czasopiśmie Machine Dynamics Problems oraz referaty wygłoszone na 2 krajowych i 5 zagranicznych konferencjach naukowych. Należy zaznaczyć, że fragmenty rozprawy wykorzystano w podrozdziale „Adaptive impact absorbers” książki pt. „Smart Technologies for Structural Safety”. Książka ta została wydana pod redakcją Promotora rozprawy przez wydawnictwo Wiley w 2008 roku.

Rozprawa, napisana w języku angielskim, liczy 139 stron, składa się z 7 rozdziałów (str. 1–116), wykazu bibliograficznego liczący 104 pozycje (str. 117–126), 2 dodatków (str. 127–134) oraz wykazów rysunków (str. 135–138) i tabel (str. 139).

2. Problematyka rozprawy

Redukcja wymuszeń kinematycznych i siłowych działających na obiekty jest jednym najbardziej praktycznych zagadnień dynamiki maszyn. Nadmierne drgania, uderzenia i wstrząsy obiektów stanowią bowiem poważny problem podczas ich eksploatacji. Dotyczy to szczególnie kwestii bezpieczeństwa oraz niekorzystnego oddziaływania na człowieka.

Redukcja drgań, szczególnie tych o niskiej częstotliwości, za pomocą tradycyjnych układów pasywnych jest na zwykle niewystarczająca. Bardziej skuteczne może być w takim przypadku zastosowanie układów aktywnych, których działanie polega na generowaniu dodatkowych sił działających na obiekt przy wykorzystaniu układu sterowania. Układy aktywne są kosztowne i wymagają dużego zapotrzebowania na energię. Nieznacznie gorsze efekty uzyskuje się stosując układy semiaktywne. Ich działanie polega na wykorzystaniu biernych elementów tłumiących i sprężystych, których siły tłumiące i sprężyste mogą być zmieniane w pewnym zakresie. Układy te wymagają zewnętrznego źródła energii na poziomie sygnałowym.

Od pewnego czasu w semiaktywnych układach redukcji drgań wykorzystywane są materiały inteligentne (smart materials) – w rozprawie takim materiałem są ciecze MR. To nowatorskie podejście do problemów aktywnej redukcji drgań, uderzeń i wstrząsów nastęca pewnych trudności. Efektem tych wysiłków jest możliwość doboru optymalnych parametrów układu. Analiza zjawisk dynamicznych, modelowanie i sterowanie takich układów wymaga interdyscyplinarnej wiedzy z zakresu: mechaniki (szczególnie teorii drgań), elektrotechniki (szczególnie teorii pola magnetycznego), mechaniki płynów, termodynamiki, automatyki, elektroniki i informatyki.

Zagadnienie podejmowane w rozprawie wynika z aktualnego problemu zwiększającego się natężenia ruchu lotniczego, które generuje konieczność sprawnego zarządzania istniejącą flotą i pożądane jest wydłużanie resursu maszyn. Dzięki stosowaniu semiaktywnych układów absorpcji energii uderzeń możliwe jest łagodzenie operacji lądowania samolotów. Potrzeba ta została dostrzeżona przez Komisję Europejską, która sfinansowała projekt badawczy (wspomniany w punkcie 1), którego celem było opracowanie adaptacyjnego podwozia lotniczego dla samolotów cywilnych.

3. Układ i treść rozprawy

Rozprawę podzielono na 7 rozdziałów.

Rozdział 1 wprowadza w problematykę rozprawy. Zawarto w nim ogólne informacje na temat projektowania amortyzatorów, aktywnych podwozi samolotów i cieczy MR. Omówiono także genezę, cele i strukturę pracy.

Rozdział 2 poświęcono głównie modelowi cieczy MR pracującej w trybie przepływu w szczelinie dla założonych wartości indukcji magnetycznej. Model ten zweryfikowano doświadczalnie na specjalnie zbudowanym urządzeniu umożliwiającym wizualizację przepływu cieczy MR.

Rozdział 3 dotyczy analizy pracy i sformułowania modelu tłumika MR firmy Lord Corporation, serii RD-1005-3, który to tłumik użyto do budowy laboratoryjnego modelu aktywnego podwozia samolotu. Zaproponowano model analityczny tego tłumika, który uwzględnia fizyczne efekty występujące podczas jego pracy. Szczególną uwagę zwrócono na problem modelowania przepływu cieczy MR.

Rozdział 4 zawiera dyskusję na temat metod przyspieszania pracy urządzeń MR. Podano główne źródła opóźnień w układzie i zaproponowano rozwiązanie tego problemu, przedstawiając przykładowe eksperymenty.

Rozdział 5 poświęcono zagadnieniom dotyczącym implementacji cieczy MR w adaptacyjnych podwoziach samolotów. Skoncentrowano się na przedstawieniu działania doświadczalnego układu absorpcji energii uderzeń. Przedyskutowano kwestię realizowalności takiego układu z absorberem MR, opisano jego konstrukcję i sprawdzono zgodność z modelem.

Rozdział 6 zawiera dyskusję na temat korzyści wynikających z zastosowania takiego układu. Szczególną uwagę zwrócono na możliwość jego implementacji w podwoziu samolotu.

Rozdział 7 jest podsumowaniem rozprawy. Zawarto w nim wnioski wynikające z przeprowadzonych badań oraz wskazano na kierunki przyszłych prac dotyczących tematyki rozprawy.

4. Analiza krytyczna

Autor poświęcił rozprawę problemowi zastosowania tłumika MR jako absorbera energii uderzeń w adaptacyjnym podwoziu samolotu przeznaczonego dla lotnictwa cywilnego. Wybrany temat rozprawy jest oryginalny, aktualny i uzasadniony względami naukowymi oraz użytecznymi. Sposób realizacji sformułowanego zadania naukowo-badawczego jest poprawny.

W rozprawie przedstawiono 2 główne cele:

- sformułowanie i sprawdzenie doświadczalne modelu przepływu cieczy MR w szczelinie,
- opracowanie i sprawdzenie doświadczalne procedury sterowania amortyzatorem uderzeń MR w modelu podwozia samolotu.

Pierwszy cel jest związany z badaniami podstawowymi, drugi z badaniami aplikacyjnymi.

Uważam, że najbardziej wartościowy jest rozdział 5, poświęcony sterowaniu absorberem energii uderzeń z cieczą MR i rozdział 6, przedstawiający wynikające z tego korzyści w badanej aplikacji. Wprowadzeniem do tych rozdziałów jest rozdział 4 omawiający możliwości przyspieszenia odpowiedzi tłumika MR. Interesujące są także fragmenty rozdziału 2 przedstawiającego model cieczy MR w trybie przepływu dla założonych zmian indukcji pola magnetycznego w szczelinie oraz rozdziału 3, w którym omówiono model analityczny tłumika RD-1005-3.

Język angielski, w którym została napisana rozprawa jest bardzo poprawny, co pozwala przy zapoznawaniu się z pracą koncentrować uwagę głównie na jej merytorycznej stronie. Struktura rozprawy jest przejrzysta. Skład tekst jest ogólnie poprawny. Pewne niedociągnięcia edytorskie i pomyłki nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę rozprawy.

4.1. Uwagi ogólne

Rozważane w rozprawie kwestie zostały poruszone szeroko i ze starannym prześledzeniem wiedzy literaturowej, poczynając od głębszej analizy pracy tłumika MR, poprzez model stanowiska badawczego i algorytmy sterowania, po wyniki symulacji numerycznych i badań doświadczalnych. Ostatnie części rozprawy wydają się nieco nieuporządkowane i poruszone za mało szczegółowo.

Za kwestie wymagające wyjaśnień Autora uważam:

- str. 18, jaka jest wartość indukcji nasycenia cieczy MR (ciecz Fraunhofera AD 275), zastosowanej w stanowisku do wizualizacji przepływu oraz materiału, z którego wykonano rdzeń ?
- str. 18, czy układ wzbudzenia z cewką mającą 140 zwojów (stanowisko do wizualizacji przepływu cieczy MR) gwarantuje wzbudzenie pola magnetycznego o wymaganej wartości indukcji w szczelinie ?
- str. 19, „...magnetyczny układ wzbudzenia może wygenerować pole o indukcji 0.5 T.” – czy jest to wartość zmierzona, czy obliczona ?
- przy jakiej temperaturze można spodziewać się odstępstwa zaproponowanego modelu przepływu cieczy MR od wyników eksperymentów ?
- str. 63, rys. 4.13 – w jaki sposób bez podania skali można wnioskować, że 4-krotny wzrost napięcia powoduje 15-krotne zmniejszenie czasu narastania natężenia prądu w cewce tłumika ?, o jaki chodzi tu przedział zmienności natężenia prądu i jaką prędkość tłoka ?, czy to narastanie odnosi się do 90% wartości maksymalnej natężenia prądu ?
- czy model 1-szego rzędu określonym przez stałą czasową L/R nie jest zbyt dużym uproszczeniem opisu procesów energetycznych odnoszące się do zjawisk zachodzących w obwodzie elektrycznym tłumika ?
- co przemawiało za wyborem realizacji regulatora dla obwodu elektrycznego, pozwalającego na zmniejszenie czasu odpowiedzi tłumika RD-1005-3, na układzie FPGA (firma Lord Co. podaje, że czas odpowiedzi tego tłumika RD-1005-3 jest mniejszy od 25 ms i zależy od zastosowanego

- sterownika mocy i jest on za duży dla rozważanej aplikacji)?,
- przy forsowaniu napięcia obwód magnetyczny tłumika będzie wchodził w stan nasycenia – w jaki sposób rozwiązany jest problem jego rozmagnesowywania?,
- str. 77, rys. 5.4 zaproponowany układ sterowania jest układem ze sprzężeniem zwrotnym z dwoma pętlami – wewnętrzną związaną z regulacją prądu w obwodzie elektrycznym tłumika i zewnętrzną związaną z regulacją przyspieszenia tłoka; sygnałem referencyjnym/wartością zadaną jest przyspieszenie uzyskane po scałkowaniu sygnału z czujnika prędkości – o jaką prędkość chodzi ?,
- w jaki sposób był przetwarzany (filtracja, kondycjonowanie,...) mierzony sygnał przyspieszenia w warunkach laboratoryjnych i jaki to ma wpływ na efektywność sterowania tłumikiem dla rozważanych algorytmów ?,
- czy ze względu na udarowy charakter pracy zastosowanego tłumika MR należy się spodziewać mniejszej jego trwałości (według specyfikacji technicznej podanej producenta jest to 2 miliony cykli dla warunków: częstotliwość wymuszenia 2 Hz, amplituda wymuszenia ± 13 mm, zmiana natężenia prądu sterującego w zakresie 0 – 0.8 A) ?
- w jakim stopniu badany model adaptacyjnego podwozia samolotu wykazuje podobieństwo dynamiczne z obiektem rzeczywistym ?
- nieadekwatne nazewnictwo: active LG, semi-active LG – raczej należałoby użyć odpowiednio: semi-active LG with feedforward (in open loop), semi-active LG with feedback,
- str. 83, jaki algorytm zastosowano w podrozdziale 5.5 – brak precyzyjnego opisu regulatora zmodyfikowanego (recoil stage),
- str. 86, skąd wnioski (1) w podrozdziale 5.6 ?,
- brak uzasadnienia dla warunków, w których były prowadzone w odniesieniu do warunków przyziemienia/lądowania samolotu występujących w rzeczywistości,
- zastosowanie AIA w przednim układzie zawieszenia samolotu I-23 (czyli weryfikacja wyników na obiekcie rzeczywistym) nieco mija się z celem, jako że największe obciążenia następują podczas uderzenia zawieszeniem głównym o pas startowy – w dodatku Autor dowodzi (słusznie), że przewaga AIA nad układem pasywnym jest najbardziej widoczna przy dużych prędkościach (energiach, obciążeniach) zderzeń,
- jaka była dokładność pomiaru przyspieszania w warunkach laboratoryjnych, a jakiej można się spodziewać w warunkach przyziemienia i jaki to będzie miało wpływ na zaproponowany sposób sterowania tłumikiem MR ?,
- które wyniki uzyskano dla obiektu rzeczywistego, a które dla stanowiska laboratoryjnego ? – jest to mało czytelne,
- w jakiej temperaturze przeprowadzono laboratoryjne badania udarowe ?,
- w jakim zakresie temperatur ma pracować rzeczywiste podwozie adaptacyjne z absorberem MR i czy w związku z tym może wystąpić degradacja własności zastosowanej cieczy MR ?,

4.2. Uwagi szczegółowe

Uwagi szczegółowe odnoszą się głównie do: zauważonych błędów w zależnościach matematycznych i stylistycznych, stosowanych skrótów, opracowania rysunków oraz odniesień do literatury. Większość z nich wynika z tego, że Autor nie sprawdził dokładnie tekstu po jego złożeniu w użytym edytorze. Te błędy zaznaczyłem w przedłożonym mi do recenzji egzemplarzu rozprawy. Poniżej podaję niektóre z tych z nich:

- opisy osi na rysunkach są niejednolite – małe i duże litery (np. rys. 2.12 i 2.13), czcionki Arial Times New Roman (np. rys. 3.19), niekiedy wytłuszczone (np. rys. 2.9), różnej wielkości, jednostki raz w nawiasach okrągłych, innym razem w kwadratowych (np. 5.12), jeszcze innym bez nawiasów (np. 5.1, 5.7), a niekiedy bez jednostek (np. rys. 4.3), ,
- legendy na niektórych rysunkach są umieszczone poza polem wykresów (np. str. 37, rys. 2.12 oraz str. 31 i 32, rys. 29. i 2.10), a na innych w polach wykresów,
- rys. 4.4 i 4.5 powinny być w podrozdziale 4.3, a nie w podsumowaniu rozdziału 4 (podrozdział 4.4),
- na niektórych stronach występują puste pola (np. pod rys. 3.8, 3.9, 3.13),

- niektóre rysunki są zbyt małe i przez to niezbyt czytelne (np. rys. 3.14),
- używanie skrótów w tytułach rozdziałów (np. rozdział 3 i 6) oraz podrozdziałów nie jest dobrym wyborem,
- brak jednolitości w stosowanych określeniach: MRF, MR fluid, MR flow (powinno raczej MR fluid flow), odnosi się to także do określenia magnetorheological damper (str. 113), choć wcześniej występują określenia MR damper i MRD oraz podobnie do określeń FE model, FEA (str. 30, 31),
- str. 50–51 podpis pod rys. 3.8 jest błędny albo też błędne jest odwołanie do niego w tekście (porównaj rys. 3.9 i do niego odwołanie),
- bardziej odpowie dla sterowanego trybu pracy tłumika MR niż „semi-active mode” jest określenie „controlled mode”,
- str. 63, odwołanie wyłącznie do pozycji literatury [84], [85] nie jest zbyt trafne – ważną pozycją w tym zakresie jest pozycja: “A comprehensive analysis of the response time of MR dampers” (Koo J.-H., Goncalves F. D., Ahmadian M., 2006, Smart Materials and Structures, 15, 351–358),
- str. 72, błędne indeksy we wzorze (5.5), dwukrotnie energia E_t ,
- Str. 75, błędne znaki nierówności w zależności na F_{opt} ,
- nie jest potrzebne wyróżnienie w uwagach końcowych (rozdział 7), w podrozdziale 7.1 podpunktu 7.1.1 (nazywanego podsumowaniem) jako osobnego podpunktu,
- odwołanie do pozycji [25] bibliografii, anonsumującej wydaną książkę „Smart Technologies for Structural Safety” jest błędne – pod tym numerem znajduje się pozycja literatury z 1982 r.

5. Osiągnięcia rozprawy

Uważam, że wkład pracy Autora rozprawy jest znaczny. Osiągnięcia rozprawy są związane z dwoma głównymi nurtami prowadzonych badań.

W zakresie badań dotyczących przepływu cieczy MR w szczelinie za takie osiągnięcia można uznać:

- projekt i budowę stanowiska do wizualizacji cieczy MR w trybie przepływu,
- sformułowanie prawa przepływu cieczy MR w warunkach niejednorodnego rozkładu pola magnetycznego w przekroju poprzecznym szczeliny,
- sformułowanie analitycznego modelu tłumika MR uwzględniającego zjawiska występujące podczas jego pracy,
- weryfikację eksperymentalną sformułowanego modelu.

W zakresie badań związanych z zastosowaniem tłumika MR jako absorbera energii uderzeń do takich osiągnięć można zaliczyć :

- projekt i budowa autorskiego stanowiska (demonstratora) do badań udarowych tego tłumika, zwłaszcza w warunkach określonych dla podwozi lotniczych,
- opracowanie algorytmu sterowania adaptacyjnymi absorberami uderzeń wykorzystującego dwie pętle sprzężenia zwrotnego, umożliwiające zminimalizowanie czasu odpowiedzi układu do 5 ms,
- projekt układu i oprogramowanie sterownika realizującego opracowany algorytm dla tłumików MR, zwłaszcza w warunków określonych dla podwozi lotniczych,
- integracja adaptacyjnego układu rozpraszania energii uderzeń z opracowanym układem sterowania oraz przeprowadzenie weryfikacji eksperymentalnej układu,
- numeryczna i laboratoryjna ocena korzyści płynących z zastosowania adaptacyjnego układu rozpraszania energii uderzeń w podwoziu samolotu,
- wykazanie korzyści opracowanego układu adaptacyjnego, który umożliwił 20% redukcję maksymalnych wartości obciążeń przenoszonych na strukturę nośną samolotu podczas przyziemienia.

6. Wniosek końcowy

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza MIKUŁOWSKIEGO poświęcona adaptacyjnej wersji podwozia samolotu dla lotnictwa cywilnego z tłumikiem MR stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi wkład do rozwoju badań nad wykorzystaniem tłumików MR.

Stwierdzam, że Doktorant:

- poprawnie sformułował i rozwiązał ciekawe zadanie naukowe, zarówno w części teoretycznej jak i doświadczalnej,
- posiadał niezbędną interdyscyplinarną wiedzę w zakresie analizy zjawisk dynamicznych, modelowania, pomiarów oraz projektowania i realizacji układów akwizycji danych pomiarowych i sterowania,
- nabył dobre umiejętności w zakresie posługiwania się nowoczesnymi narzędziami i metodami (LabView, MATLAB),

co pozwoliło Mu na skuteczne rozwiązanie postawionego zadania.

Uważam, że zalety merytoryczne rozprawy przeważają nad uwagami krytycznymi. Dlatego też w mojej opinii rozprawa zasługuje na pozytywną ocenę.

Na tej podstawie uznaję, że rozprawa **mgr inż. Grzegorza MIKUŁOWSKIEGO** pt. „**Adaptive impact absorbers based on magnetorheological fluids**” spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony.

