

Recenzja pracy doktorskiej  
**mgra inż. Grzegorza Mieczysława Mikułowskiego**  
p.t.

**„Adaptive impact absorbers based on magnetorheological fluids”**

**Wizerunek Doktoranta - Pana mgra inż. Grzegorza Mieczysława Mikułowskiego**

Mgr inż. Grzegorz Mieczysław Mikułowski urodził się w 1977 r. Jest absolwentem Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Dyplom Magistra Inżyniera Mechanika z wynikiem dobrym uzyskał w roku 2002. Jak wynika z przedłożonych przez Doktoranta dokumentów, po zakończeniu studiów rozpoczął działalność naukową w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN, początkowo jako doktorant, a od 2007 roku jako asystent. Pracując przez kilka lat z Doktorantem w tym samym zakładzie w IPPT PAN mogę stwierdzić, iż mgr inż. Grzegorz M. Mikułowski jest mocno umotywowanym, ambitnym i rzetelnie pracującym młodym badaczem. Wymiernym wynikiem Jego dotychczasowej pracy w IPPT PAN jest współautorstwo w trzech artykułach naukowych (w tym dwóch z Listy Filadelfijskiej) i autorstwo jednego rozdziału monografii w języku angielskim. Ponadto, mgr inż. Grzegorz M. Mikułowski ma w swoim dotychczasowym dorobku 5 prezentacji konferencyjnych, w tym jedną w kraju i cztery zagranicą. Efektem finalnym działalności badawczej mgra inż. Grzegorza M. Mikułowskiego jest napisanie rozprawy doktorskiej pt. „*Adaptive impact absorbers based on magnetorheological fluids*” złożoną do recenzji w 2008 roku.

**Charakteryzacja rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska mgra inż. Grzegorza M. Mikułowskiego jest napisana na 139 stronach maszynopisu w formie 7 rozdziałów, w tym jeden zawierający wstęp, tj. rozdział 1, oraz podsumowanie i wnioski ujęte w rozdziale 7. Ponadto, rozprawę uzupełniono o dwa załączniki stanowiące jej integralne części. Tekst pracy zawiera dużą liczbę rysunków, wykresów, fotografii, tabel oraz spis cytowanej literatury obejmujący 104 pozycje.

Praca dotyczy ważnego problemu aktywnego sterowania ruchem układu mechanicznego pod obciążeniem udarowym przy wykorzystaniu siłowników z cieczą magnetoreologiczną. Zagadnienia aktywnego sterowania ruchem układów mechanicznych i konstrukcji należą obecnie do podstawowych działów mechatroniki stanowiąc nowoczesny kierunek badań zarówno poznawczych jak i aplikacyjnych. Zastosowanie do tego celu aktuatorów z cieczą magnetoreologiczną podkreśla nowatorskość prowadzonych w rozprawie rozważań. Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny, gdzie wnikliwe rozważania analityczne zostały zweryfikowane za pomocą odpowiednich obiektów rzeczywistych w warunkach laboratoryjnych.

Wstęp pracy nie zawiera typowego zazwyczaj w dysertacjach naukowych przeglądu literaturowego, na podstawie którego można osadzić całość przedstawionej tematyki na tle istniejącego obecnie stanu wiedzy. W tej pracy tzw. „state-of-the-art” dokonywany jest

fragmentarycznie w poszczególnych rozdziałach odnosząc się już bezpośrednio do przeprowadzanych w nich rozważań. We Wstępie natomiast, po krótkim podkreśleniu ważności tematyki rozprawy, Autor podaje podstawowe informacje dotyczące konkretnych aktuatorów stosowanych w szczególności do aktywnych podwozi lotniczych oraz opisuje działanie cieczy magnetoreologicznej wykorzystywanej w aktuatorach służących do sterowania ruchami w różnych wzajemnych kierunkach. W końcowej części Wstępu Autor precyzyjnie nakreśla cel pracy, szkicuje jej strukturę oraz wyszczególnia oryginalne elementy nowości naukowej rozprawy.

Drugi rozdział pracy jest poświęcony modelowaniu przepływu cieczy magnetoreologicznej. Do tego celu został wybrany model Bingham'a wykorzystujący równanie konstytutywne ciała plastycznego wychodząc z podstaw klasycznej mechaniki płynów nieściśliwych. Zaletą tego modelu (również zdaniem Autora) jest jego względna prostota pozwalająca na uzyskanie analitycznego rozwiązania opisu matematycznego przepływu. Natomiast pewnym mankamentem modelu Bingham'a jest jego przydatność do łatwego opisu jedynie przepływów stacjonarnych. Niemniej jednak, w przypadku rozpatrywanych aktuatorów z cieczą magnetoreologiczną to ograniczenie nie stanowiło przeszkody w zastosowaniu tego modelu, co Autor wykazał w następnym, trzecim rozdziale rozprawy. W drugiej części rozdziału drugiego Autor zbadał również wpływ działania strumienia magnetycznego na przepływ cieczy magnetoreologicznej.

W trzecim rozdziale pracy Autor modeluje aktuator z cieczą magnetoreologiczną, który ze względu na sterowanie jego własnościami dyssypacyjnymi nazywa tłumikiem magnetoreologicznym. Obiektem rozważań jest komercyjny tłumik magnetoreologiczny typu 1005-3 wyprodukowany przez firmę LORD. Do tego celu przyjmuje model mechaniczny o dwóch stopniach swobody będący równoległym połączeniem zwykłego tłumika ciernego z tarciami suchym i reologicznym tzw. modelu kombinowanego ciała lepko-sprężystego. Następnie, na odpowiednim stanowisku laboratoryjnym zidentyfikowano parametry tego modelu określające jego własności sprężyste pochodzące od sił pneumatycznych tłumika, własności dyssypacyjne pochodzące od sił hydraulicznych wywoływanych przepływem cieczy przez pierścieniową kryzę oraz parametry opisujące siły tarcia suchego w tym tłumiku potraktowanym tu jako urządzenie adaptujące się do przenoszonego obciążenia. W zakończeniu tego rozdziału zarówno zidentyfikowany model tego tłumika jak i sam tłumik rzeczywisty na stanowisku doświadczalnym zostają poddane obciążeniu typu udarowego w celu wykazania zgodności teorii z eksperymentem oraz wspomnianej powyżej przydatności modelu Bingham'a przepływu cieczy w zastosowaniu to obiektów poddawanych obciążeniom dynamicznym.

Stosunkowo krótki rozdział czwarty jest poświęcony analizie możliwości dostatecznie szybkiego sterowania aktuatorem z cieczą magnetoreologiczną w celu jak najbardziej efektywnego reagowania na obciążenia udarowe, jakich doznają podwozia samolotów podczas przyziemienia. Przy wykorzystaniu odpowiednio zmodyfikowanego przykładania napięcia do elektrycznego obwodu typu RL zasilającego elektromagnes wytwarzający pole magnetyczne w tłumiku magnetoreologicznym Autor uzyskał zadowalająco krótkie czasy reagowania układu sterującego krótkotrwałymi procesami udarowymi.

W piątym rozdziale pracy Autor zaproponował algorytm sterowania siłą tłumiącą aktuatora magnetoreologicznego w zastosowaniu do podwozia samolotu. Idea sterowania sprowadza się do teoretycznie całkowitego wytracania łącznej energii kinetycznej i potencjalnej układu mechanicznego przez tłumik magnetoreologiczny. Wyniki rozważań teoretycznych przeprowadzonych za pomocą oscylatora dynamicznego o jednym stopniu swobody wykorzystano do badań doświadczalnych. Opracowana w ten sposób metoda

sterowania pozwoliła na znaczne (jak wynika z pracy ok. 30 procentowe) zmniejszenie siły uderzenia przenoszonej przez laboratoryjny układ mechaniczny przy jednoczesnym zmniejszeniu (również ~30%) skoku (ugięcia) tego układu. Ponadto, udało się również istotnie zmniejszyć amplitudy drgań przejściowych powstających w wyniku uderzenia.

Rozdział szósty rozprawy zawiera konkretne już zastosowanie adaptacyjnego tłumika magnetoreologicznego do sterowania ruchem przedniego podwozia awionetki. Badania stanowiskowe zostały tu poprzedzone wnikliwym studium teoretycznym opartym na mechanicznym modelu o dwóch stopniach swobody i zmodyfikowanych, rozwiązywanych numerycznie równaniach ruchu wziętych z pracy Milwitzki'ego i Cook'a z 1953 roku. W badaniach teoretycznych i doświadczalnych wykorzystywano techniki semi-aktywnego oraz aktywnego sterowania siłą tłumiąca (hydrauliczną), gdzie analogiczne odpowiedzi układu pasywnego wywoływane sygnałem udarowym imitującym przyziemienie podwozia samolotu traktowano jako wyniki odniesienia. Na podstawie odpowiednich porównań wykazano przewagę sterowania aktywnego i semi-aktywnego nad układem pasywnym, jako uwidaczniających się szczególnie w warunkach lądowania przy większej prędkości opadania samolotu bądź jego większej masie, uzyskując mniejsze wartości przeciążenia podwozia przy jego mniejszym ugięciu (skoku).

### **Ocena rozprawy doktorskiej**

Należy stwierdzić, że przedłożona rozprawa jest wyczerpującym i wartościowym opracowaniem naukowym zawierającym wyniki obliczeń i pomiarów doświadczalnych, które wydają się być niezwykle przydatne zarówno do potrzeb naukowo-badawczych, jak i inżynierijno-technicznych. Zaletą pracy jest przejrzystość przedstawianych w niej informacji, gdzie nawet każdy rozdział Autor zakończył odpowiednim podsumowaniem uzyskanych rezultatów i uwypukleniem elementów nowości. Ponadto, Autor zadał sobie trud podając w spisie cytowanej literatury numery stron, na których miało miejsce odwołanie się do poszczególnych pozycji. Język angielski użyty w rozprawie jest ogólnie bardzo poprawny i zrozumiały, mimo iż miejscami Autor wykazuje pewną nieporadność m. in. w postaci polonizmów (na przykład cyt. "... factors coming into play ..." na stronie 91, co chyba miało znaczyć „czynniki wchodzące w grę”, "... to deep analysis of effects, ..." na stronie 112, co zapewne znaczy „pogłębić analizę efektów”), błędów stylistycznych polegających na powtarzających się bezpośrednio po sobie imiesłowach (na przykład cyt. „... resulting reacting damping force ..." na tej samej stronie) oraz licznie niewłaściwie użytych rodzajnikach określonych i nieokreślonych "a" i "the".

Mimo ogólnej poprawności rozwiązanych w rozprawie zadań, przedłożoną pracę charakteryzują pewne mankamenty wymagające skomentowania.

#### Ważniejsze usterki pracy:

1. Rozprawę cechuje stosunkowo słaba spójność merytoryczna jej poszczególnych rozdziałów. Czytając pracę odnosi się wrażenie, jakby każdy rozdział stanowił oddzielne opracowanie naukowe mające własną koncepcję i model, gdzie wykorzystywanie wyników z jednego rozdziału w innym nie jest wyraźnie widoczne. Na przykład, w rozdziale drugim Autor pieczołowicie buduje model przepływu cieczy magnetoreologicznej przez kryzę aktuatora, a w rozdziale trzecim modeluje już sam aktuator przeznaczony w domyśle do sterowania ruchem podwozia samolotu, by w rozdziale szóstym, zawierającym pewną kwintesencję całej rozprawy, wykorzystując inny model fizyczny i matematyczny podwozia samolotu opublikowany w pracy z przed ponad pół wieku. Dotyczy to przede wszystkim opisu siły hydraulicznej (wzór (6.5) na stronie 89), w którym w celu sterowania uzmiennione zostało pole powierzchni kryzy  $A_0$ .

2. W rozdziale trzecim Autor wnikliwie modeluje istniejący już komercyjny tłumik magnetoreologiczny. Generalnie, modelowanie fizyczne i matematyczne istniejących obiektów rzeczywistych jest powszechnie obserwowaną praktyką. Jednak w omawianym przypadku nowoczesnego urządzenia, jakim jest ów tłumik znanej firmy LORD, trudno wyobrazić sobie by został on skonstruowany i wyprodukowany bez uprzedniej analizy teoretycznej i komputerowej symulacji działania. Dlatego nasuwa się obawa, czy przypadkiem podobny lub analogiczny model tłumika do tego, który opracował Autor, nie został stworzony już przedtem i, w związku z tym, jak wygląda faktyczny element nowości tej części rozprawy? Autor nie wyjaśnił tej kwestii w pracy.
3. W rozdziale piątym wyrażenie (5.7) na stronie 74 określające całkowitą energię wytracaną podczas uderzania układu mechanicznego o podłoże jest zapisane jak dla stałych sił dyssypacyjnej i sprężystej działających na przemieszczeniu  $x$ . Jednak w tym wzorze siły te są wyrażone jako zmienne funkcje odpowiednio prędkości i przemieszczenia. Z kolei, we wzorze (5.8) na tej samej stronie równoważna pracy siły stałej (co zaznaczono w tekście) wytracana energia jest wyrażona w formie całkowitej, jak w przypadku siły zmiennej. Te wzory sprawiają nie tylko wrażenie błędnych, ale utrudniają zrozumienie działania algorytmu sterującego opisanego dalszymi formułami.
4. W pracy jest badane zjawisko wyhamowywania ruchu pionowego układu mechanicznego wskutek jego zetknięcia się z podłożem potraktowanym jako sztywne, a więc zmniejszania prędkości opadania tego układu od pewnej wartości początkowej do zera. Wtedy układ mechaniczny doznaje opóźnienia ruchu pionowego. Niestety, w opisie tego procesu Autor dość chaotycznie używa pojęcia przyspieszenia oraz opóźnienia opatrując przy tym podawane wartości liczbowe znakiem dodatnim lub ujemnym bez żadnych wyjaśnień. Ten mankament pracy bardzo utrudnia pełne zrozumienie zawartych w rozdziałach piątym i szóstym obszernych fragmentów opisów uzyskanych wyników. W celu uniknięcia tej usterki należałoby precyzyjnie zdefiniować, którą fazę ruchu pionowego potraktujemy jako opóźnienie, a którą jako przyspieszenie wraz z nadawaniem odpowiednich znaków ich wartościom liczbowym.
5. Zarówno z uzyskanych rezultatów obliczeń teoretycznych oraz pomiarów doświadczalnych wynika, że znaczenie semi-aktywnego i aktywnego sterowania siłą tłumiącą uderzenia podwozia podczas przyziemienia samolotu staje się faktycznie istotne przy większych prędkościach opadania statku powietrznego oraz przy większych wartościach jego masy przypadającej na dane podwozie. Dlaczego więc Autor rozpatrywał przyziemienie przedniego podwozia, na które, jak wiadomo, przypada znacznie mniejsza masa całego samolotu niż na podwozie główne oraz, kiedy przy obecnie praktykowanym zazwyczaj sposobie lądowania na podwozie główne, podwozie przednie uderza o pas już z nieco wytraconą prędkością opadania?
6. W rozdziale piątym Autor opracował koncepcję sterowania wykorzystując jako model teoretyczny oscylator lepko-bezwładnościowo-sprężysty o jednym stopniu swobody. Ta koncepcja sterowania zostaje następnie wykorzystana do odpowiedniego rzeczywistego mechanicznego układu doświadczalnego poddawanego obciążeniom udarowym w celu porównywania odpowiedzi dynamicznych w przypadku układu pasywnego i aktywnego. Ten rzeczywisty obiekt laboratoryjny Autor również nazywa układem o jednym stopniu swobody (na stronie 78 i 80 w podpisie rysunku 5.8), co jest formalnie błędne. Szkoda, że Autor nie porównał także teoretycznych odpowiedzi uzyskanych za pomocą swojego oscylatora z odpowiedzią analogicznego klasycznego oscylatora jednym stopniu swobody o zlinearyzowanych parametrach lepko-sprężystych wzbudzoną identycznym obciążeniem udarowym i uzyskaną analitycznie lub również numerycznie. Wówczas, czytelnik miałby

lepszą możliwość oceny zarówno efektywności sterowania, jak i wpływu nieliniowości charakterystyk lepko-sprężystych aktuatora.

#### Usterki drobne:

1. W całej rozprawie Autor używa dużo skrótów. Te skróty zostały wprowadzone formalnie wyjaśnione w różnych miejscach tekstu, jednak ich liczebność i związana z tym naturalna trudność w zapamiętaniu utrudniają czytanie pracy. Ponadto, umieszczenie w tej sytuacji skrótów w spisie treści pracy, a więc na samym jej początku, jest wręcz niedopuszczalne. Dlatego, wydaje się tu niezbędnym wprowadzenie odpowiedniego skorowidza skrótów obowiązujących w całej dysertacji.
2. Autor wykazuje pewną niefrasobliwość w nazywaniu niektórych wielkości fizycznych. Na przykład, we wzorach (2.3), (2.11), (A.1) i (B.1) oraz na stronach 21 i 23 zamiast pojęcia przyspieszenia grawitacyjnego lub unormowanego przyspieszenia grawitacyjnego (ang. "gravitational acceleration") Autor operuje pojęciami „ciężenia” (ang. "gravity") lub wprost „gravitacji” (ang. "gravitation"), co w tych przypadkach jest błędne. Na domiar złego, opisy wielkości występujących w ww. wzorach mają formę zwykłej punktowej wyliczanki, a nie eleganckiego stylu pełnozdanowego, właściwego w monografiach i artykułach naukowych. Podobnie, we wzorze (3.15) i (6.6) wskutek błędnego zdefiniowania symboli oznaczających siłę tarcia i współczynnik tarcia występuje ewidentna niezgodność wymiarów lewych i prawych stron równań. Z kolei, w podpisie rysunku 5.8 na stronie 80 przedstawiającym wykresy przebiegów typowych wielkości kinematycznych, tj. przyspieszenia, prędkości i przemieszczenia, Autor użył sformułowania, cyt. "Kinetics of the analysed 1 DoF system in time domain". Należy pamiętać, iż (na przykład wg „Encyklopedii Fizyki”, PWN, Warszawa 1973) kinetyka jest działem mechaniki zajmującym się badaniem ruchu ciał z uwzględnieniem działających na nie sił, a kinematyka jest natomiast działem mechaniki zajmującym się badaniem geometrycznych własności ruchu ciał bez uwzględniania ich masy i działających na nie sił. Dlatego więc, pojęć tych nie wolno mieszać.
3. Błędnie podany numer rysunku 4.5 na stronie 71.
4. Błędnie podane indeksy we wzorach (5.4) i (5.5).
5. Błędny zwrot nierówności w wyrażeniu na optymalną siłę absorpcji na stronie 75.
6. Brak formalnego wyjaśnienia znaczenia symboli w wyrażeniu na  $Ctrl(t)$  na stronie 76.
7. Niezrozumiały, chyba niepotrzebny symbol „c” między akapitami na stronie 80.
8. Co oznacza wyrażenie "normal loading" na stronie 90?
9. Wyrażenie "the scope of this paper" jest niewłaściwe, ponieważ przedłożona praca nie jest artykułem naukowym ani publikowanym referatem konferencyjnym, lecz dysertacją.
10. Słowo "decreases" w 11 linii pierwszego akapitu na stronie 95 powinno być chyba zamienione na "increases", gdyż w przedstawionej wersji opisywane fakty są niezrozumiałe.
11. Punkt 7.3, w którym omawiane są aspekty eksploatacyjne tłumików magnetoreologicznych, rozdziału siódmego zawierającego wnioski końcowe faktycznie raczej nie przystaje do całokształtu merytorycznego rozprawy, co zaznacza również sam Autor. W związku z tym wydaje się, że można byłoby ten punkt pominąć.

12. Pomyłka w ostatnim wzorze na stronie 127, tzn. jest  $\frac{\partial^2 u}{\partial w^2}$ , a powinno być  $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ .

13. W rozdziale szóstym Autor stosuje dwie koncepcje sterownia, nazywając je odpowiednio „semi-aktywną” i „aktywną”. Rozpatrywana w rozprawie metoda sterowania aktuatorami z cieczą magnetoreologiczną polega w zasadzie na adaptacji własności tłumiących układu mechanicznego w warunkach obciążenia udarowego niż na aktywnym generowaniu zewnętrznej siły sterującej, chyba że można rozumieć to inaczej. Niemniej, obydwie ww. koncepcje są pod tym względem wzajemnie podobne, różniąc się jedynie rodzajem pętli sterowania, tj. pętli otwartej w przypadku sterowania nazwanego w pracy „semi-aktywnym” oraz pętli zamkniętej w przypadku sterowania nazwanego tu „aktywnym”. Taką typowo nomenklaturową kwestię warto byłoby przedyskutować.

### Stanowisko końcowe

Reasumując, należy stwierdzić, iż pomimo charakteryzujących pracę mankamentów merytorycznych i drobnych usterek, oczywiste walory poznawcze i aplikacyjne omawianej rozprawy, jej szeroki zakres oraz ambitnie zrealizowany cel, jak również ogólny wizerunek zawodowy Doktoranta – Pana mgr inż. Grzegorza M. Mikułowskiego, pozwalają na nadanie mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm. Dz. U. z 2005 r., nr 164, poz. 1365) i na dopuszczenie dysertacji do publicznej obrony. Oczekuję przy tym pisemnej odpowiedzi Autora rozprawy na postawione w niniejszej recenzji główne zarzuty i wymienione wątpliwości.

