

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Skubis
Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki
Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 10
44 – 100 Gliwice

Gliwice, 2010. 08. 25



RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marka KCIUKA
pt. „Badania pomiarowe i modele aktuatorów SMA uwzględniające zjawiska
elektro-termo-mechaniczne oraz ich wykorzystanie w układach sterowania”

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej, prof. dr. hab. inż. Lesława Topór-Kamińskiego, zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Pol. Śląskiej z dnia 06. lipca 2010 roku. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński.

1. Opinia o tematyce, celu i zakresie rozprawy

Problematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marka Kciuka dotyczy badania i modelowania nowych materiałów elektrotechnicznych, nazywanych materiałami z pamięcią kształtu, a w skrócie określanych akronimami SMA, SMP. Zjawisko pamięci kształtu polega na wystąpieniu w materiale przemiany fazowej austenit – martenzyt w określonym przedziale temperatur, co wiąże się z odwracalnym odkształceniem plastycznym materiału, obok występującego normalnie odkształcenia sprężystego. W literaturze obserwuje się wzrastającą liczbę publikacji o możliwościach i zastosowaniach materiałów SMA, ale w znanych mi artykułach wiadomości są przeważnie powtarzane, niewiele jest wiadomości pogłębiających stan wiedzy. Na tym tle recenzowaną pracę wyróżniają następujące cechy:

- podejście do problematyki materiałów SMA od strony inżyniera, który chce zaprojektować urządzenie robotyki z wykorzystaniem materiałów SMA dostępnych na rynku,
- opracowanie metodyki i wykonanie badań eksperymentalnych wybranych materiałów w zakresie znacznie przekraczającym dane materiałowe udostępniane przez producentów,
- opracowanie prostych modeli dobrze opisujących charakterystyki elektro-termo-mechaniczne materiałów SMA, zarówno statyczne jak i dynamiczne.

Jako cel pracy autor wskazuje opracowanie modelu aktuatora ciągnowego wykonanego ze stopu SMA. Model ten ma umożliwić zaprojektowanie prostego układu sterowania aktuatora zadającego przesunięcie liniowe i oddziałującego z określoną siłą na element przemieszczany przez robota. Ilustracją zastosowania tego modelu jest opracowany w ramach pracy chwytak do robota IRP4s. Zakres pracy obejmuje kilka wyodrębnionych zadań prowadzących do osiągnięcia celu pracy.

Ogólnie mogę stwierdzić, że tematyka pracy jest aktualna, cel pracy jest określony konkretnie, a zakres pracy prowadzący do realizacji celu jest wystarczający.

Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny. Osiągnięcie celu pracy wymagało określenia warunków badania materiałów, których spełnienie zapewniłoby powtarzalność wyników badań i możliwość wnioskowania naukowego. Znane z literatury doniesienia o badaniach materiałów SMA są cząstkowe, raportowane wyniki badań otrzymywane były w różnych warunkach i nie stanowią podstawy do uogólnień. Autor zastosował metodę badań obejmującą zadawanie jednoznacznie określonych wymuszeń w postaci natężeń prądu i naprężeń rozciągających w badanym materiale o postaci cięgna, a następnie wykonał badania trzech różnych materiałów SMA. Są to materiały o różnych składach chemicznych, o różnych temperaturach przemiany oraz o różnych wymiarach. Zakres rozprawy obejmuje opracowanie metodyki badań materiałów SMA. Autor zaprojektował i skonstruował prototypowe wyspecjalizowane stanowisko do badań materiałów SMA, które modernizował w trakcie

badania, i wykonał badania charakterystyk elektro-termo-mechanicznych wybranych cięgien wykonanych ze stopu Flexinol.

Temat rozprawy oceniam jako aktualny i sformułowany poprawnie. Autor jednoznacznie sprecyzował zagadnienie, jakie postanowił rozwiązać. Jest to zagadnienie naukowe, o randze odpowiadającej rozprawom doktorskim. Podjęcie tematu należy uznać za celowe z punktu widzenia naukowego i uzasadnione potrzebami praktycznymi. Wyniki badań uzyskane przy realizacji rozprawy będą przydatne dla potrzeb aktualnych badań naukowych a także są aplikacyjne.

W zakresie tematyki rozprawy autor opublikował 3 referaty w materiałach konferencji (1 krajowej i 2 międzynarodowych), które uwzględnił w spisie literatury. Autor zna i wykorzystuje najnowszy stan wiedzy w zakresie właściwości, badania i aplikacji stopów SMA.

2. Ocena treści rozprawy

W rozdziale 2 przedstawione jest wprowadzenie do problematyki rozprawy, opracowane na podstawie przeglądu literatury. Zdefiniowane są pojęcia podstawowe związane z problematyką rozprawy, omówione są właściwości materiałów SMA, ich zastosowania oraz sposoby wzbudzania efektu SME. W tym zakresie wkład autora do problematyki polega na uporządkowaniu wiedzy i przedstawieniu jej w przystępny sposób.

W rozdziałach 3. i 4. przedstawione jest stanowisko do badania właściwości cięgien wykonanych z materiałów SMA i jego kolejne modernizacje. Stanowisko zostało zaprojektowane i wykonane przez doktoranta. Przedstawiona jest konstrukcja mechaniczna, umożliwiająca zadawanie znanego obciążenia ciągną, pomiar jego skrócenia na skutek zjawiska SME, pomiar temperatury ciągną oraz pomiary wielkości elektrycznych (natężenia prądu, rezystancji i mocy) oraz odpowiednie ekranowanie optyczne. Zastosowane zostały współczesne przyrządy pomiarowe, pracujące w automatycznym systemie pomiarowym, opartym na szeregowo-równoległej magistrali GPIB, oprogramowanym w języku G w środowisku LabVIEW. System integruje pomiary wszystkich uwzględnionych w badaniach wielkości, za wyjątkiem zadawania obciążenia mechanicznego ciągną. Dzięki temu możliwe jest w dużym zakresie zdalne sterowanie wykonywaniem pomiarów, co umożliwia pracę systemu bez obecności operatora na stanowisku pomiarowym, a tym samym minimalizuje określone składniki niepewności pomiarów. Dobrym pomysłem autora było zastosowanie kamery termowizyjnej do pomiaru temperatury ciągną, które jest cienkie i długie, a zatem wykorzystane są zalety pomiaru bezdotykowego: brak odprowadzania ciepła przez termometr oraz możliwość uśrednienia temperatury zmiennej wzdłuż długości i obwodu ciągną.

Pomiary charakterystyk cięgien były bardzo długotrwałe, ponieważ obejmowały zależności wieloparametrowe, które musiały być wykonywane wielokrotnie ze względu na konieczność oceny powtarzalności. Ponadto pomiary były kilkakrotnie powtarzane ze względu na kolejne modernizacje stanowiska, wynikające z doświadczeń przy jego eksploatacji.

W rozdziale 5 przedstawione zostały wyniki badań charakterystyk statycznych i dynamicznych wybranych cięgien. Jest kilka rodzin charakterystyk, eksponujących zasadnicze cechy materiałów SMA: histerezę oraz nieliniowość. Dla każdej rodziny charakterystyk jest określona w punktach procedura kalibracji stanowiska oraz pomiaru charakterystyk materiału, co dobrze świadczy o umiejętnościach prowadzenia prac eksperymentalnych przez doktoranta. Charakterystyki statyczne dotyczą faz aktywacji (przejście od fazy martenzytu do fazy austenitu) oraz dezaktywacji (przejście odwrotne). Na podstawie tych charakterystyk w rozdziale 6. scharakteryzowane jest ciągną SMA jako aktuator przesunięcia liniowego, czyli określone są wartości graniczne parametrów, istotne z punktu widzenia projektanta urządzeń wykonawczych robotów.

W obszernym rozdziale 7. przedstawiony jest model matematyczny cięgna wykonanego z materiału SMA. Autor wykorzystał podobieństwo kształtu charakterystyki określającej prawdopodobieństwo znalezienia elektronu o określonym spinie w zbiorze elektronów (równanie Fermiego – Diraca) i charakterystyki przemiany martenzytycznej. Ten pomysł nie jest oryginalny, ale został on przez autora rozwinięty i zaadaptowany do określonych cięgien, przez wyznaczenie odpowiednich współczynników równań aproksymujących. Zjawisko przemiany martenzyt – austenit jest odwracalne, ale wykazuje histerezę, wynikającą z różnego przebiegu zjawiska aktywacji i dezaktywacji materiału SMA. Z tego powodu każda jednokierunkowa gałąź pętli histerezy została opisana równaniem o innych wartościach współczynników. Wykazano, że przy takim podejściu szerokość pętli histerezy jest równa różnicy określonych współczynników obu równań. Jest to podejście oszczędne pod względem numerycznym w aplikacjach, a daje efekty porównywalne, jak złożone równanie Preisacha opisujące pętlę histerezy.

Autor wykazał, że dokładność aproksymacji charakterystyk pomiarowych statycznych można zwiększyć przez dodanie do równania typu Fermiego Diraca składnika wielomianowego pierwszego lub drugiego rzędu. Dla kilku przypadków obliczył wartości współczynników tego składnika, na podstawie wyników przeprowadzonych badań.

Charakterystyki dynamiczne odpowiedzi przetwornika były wyznaczone pomiarowo tylko dla jednego parametru wejściowego – prądu nagrzewającego, przy kilku różnych wartościach obciążenia. Określone zostały odpowiednie wartości stałych czasowych i wzmocnień dla obu kierunków zmian prądu. Wyznaczone równania statyczne (29), (30) i dynamiczne (40), (41) umożliwiają projektowanie inżynierskie układów sterowania dla aktuatorów SMA, ponieważ wiążą wymuszenie prądu nagrzewania, przemieszczenia końcówki roboczej i czasu reakcji. Jest to cenne osiągnięcie własne autora, dające możliwość aplikacji przy względnie prostym układzie sterowania cyfrowego.

3. Ocena wiedzy doktoranta w zakresie dyscyplin związanych z tematyką rozprawy

Problematyka rozprawy obejmuje wiedzę z zakresu metrologii elektrycznej, elektromechaniki, mechatroniki i robotyki. Wiedza ta obejmuje teorię i badania eksperymentalne nowoczesnych materiałów inteligentnych o potencjalnych zastosowaniach w robotyce jako sensory albo elementy wykonawcze. Autor posługuje się modelami matematycznymi, ale ma też dobre rozeznanie problemów inżynierskich związanych z budową, badaniami i aplikacjami sensorów i aktuatorów wykonanych z materiałów SMA. Stwierdzam, że autor dysponuje wymaganym do prowadzenia badań naukowych zasobem wiedzy ogólnej z zakresu metrologii elektrycznej, zwłaszcza tego obszaru, który dotyczy badań eksperymentalnych nowoczesnych sensorów. Doktorant wykazał się pogłębioną wiedzą w dziedzinie badania właściwości fizycznych nowoczesnych materiałów elektrotechnicznych, wykonał pracochłonne badania eksperymentalne, rzetelnie je udokumentował i opracował dla nich podbudowę teoretyczną.

4. Ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa liczy 145 stron oraz dodatkowo strony ze spisami oznaczeń i literatury. Język rozprawy jest poprawny, a usterki edycyjne w tekście są bardzo nieliczne. W rozprawie występują prawidłowe odwołania do literatury przedmiotu, przy czytaniu pracy nie ma wątpliwości jakie wiadomości pochodzą z literatury, a co jest osobistym dorobkiem autora. Wykaz literatury obejmujący 101 pozycji zawiera pozycje aktualne i wystarczająco reprezentatywne dla tematyki rozprawy.

Pracę należy uznać za kompletną, ponieważ obejmuje niezbędne podstawy teoretyczne, prawidłowo wykonane badania eksperymentalne oraz prawidłowe wnioski.

5. Uwagi dyskusyjne i ogólne

Przy czytaniu pracy nasunęły mi się następujące ważniejsze uwagi krytyczne i pytania.

- 5.1. Dlaczego nie wykonano pomiarów charakterystyk dynamicznych przy zadawaniu skoku jednostkowego obciążenia mechanicznego?
- 5.2. Proszę o scharakteryzowanie wpływu temperatury na wyniki przeprowadzonych badań. Jak oszacowano zakresy zmian temperatury otoczenia i cięgna w czasie badań?
- 5.3. Uśrednianie współczynnika a dla dwu kierunków przemiany (str. 110) nie ma uzasadnienia w teorii, ani też nie jest potrzebne. Ten fragment pracy można usunąć bez szkody dla całości pracy.

6. Uwagi szczegółowe

- 6.1. Większość wykresów charakterystyk jest narysowana bardzo grubymi liniami, a punkty są oznaczone bardzo dużymi markerami, co z jednej strony maskuje rozrzut punktów, ale z drugiej uniemożliwia obserwację małych zmian wynikających z przebiegu zjawiska. W efekcie wykresy niektórych charakterystyk nakładają się na siebie, co utrudnia wnioskowanie na ich podstawie.
- 6.2. Więcej informacji dałoby się przedstawić na wykresach różnic charakterystyk, np. wynikających z pomiarów i z aproksymacji, albo z pomiarów w różnych warunkach, gdy wyniki prawie się pokrywają. Przy właściwym doborze skal można wtedy precyzyjnie obserwować różnice i na tej podstawie określać ilościowe miary zgodności charakterystyk, zamiast określić jakościowych takich jak np. „dobra zgodność”, „bardzo dobra powtarzalność” itp. Dotyczy to np. wykresów 3.26, 7.3.
- 6.3. Nie jest jasne, co to są wskaźniki zakresu temperatur aktywacji i dezaktywacji (str. 103).
- 6.4. Z czego wynikają szerokie wstęgi wykresów przedstawionych na rys. 7.7? W pracy nie ma na ten temat żadnego komentarza.
- 6.5. Wyniki pomiarów odstające od gładkiego wykresu charakterystyki są zwykle podejrzane, że są obarczone błędami grubymi, i jako takie powinny być usunięte ze zbioru, na podstawie którego przeprowadza się wnioskowanie. Najpierw jednak trzeba pomiary w takich punktach powtórzyć, niekiedy kilkakrotnie, aby decyzje o usunięciu lub pozostawieniu takich punktów miały obiektywną podstawę. Dotyczy to np. wykresu z rys. 7.9.

Wyszczególnione uwagi dyskusyjne i krytyczne nie obniżają pozytywnej oceny ogólnej rozprawy.

7. Podsumowanie i wnioski końcowe

Praca należy do obszaru zainteresowań metrologii elektrycznej, elektromechaniki i mechatroniki, i w tym zakresie należy do dyscypliny naukowej Elektrotechnika. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, istotnego dla współczesnej techniki pomiarowej i elektromechanicznego przetwarzania energii w układach sterowania, oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta w zakresie metrologii. Doktorant rozwiązał zagadnienie naukowe będące tematem rozprawy, oraz wykazał, że ma niezbędne kwalifikacje do prowadzenia badań naukowych. Praca nie wymaga zmian ani uzupełnień, a jej merytoryczny zakres pracy oceniam jako kompletny dla spełnienia wymagań pracy doktorskiej. Stwierdzam, że doktorant potwierdził tezę i zrealizował zamierzone cele pracy.

Przedstawione uwagi krytyczne powinny być wzięte pod uwagę przy wykorzystaniu wyników pracy w dalszych badaniach i publikacjach.

Stwierdzam, że opiniowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w obowiązujących przepisach i wnioskuję o jej przyjęcie jako rozprawy doktorskiej i o dopuszczenie mgr. inż. Marka Kciuka do publicznej obrony.