

-----  
tytuł, stopień, imię i nazwisko

-----  
data

Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych  
Politechnika Łódzka

-----  
miejsce pracy



## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRYCZNEGO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Tytuł rozprawy: *“Badania pomiarowe i modele aktuatorów SMA, uwzględniające zjawiska elektro-termo-mechaniczne oraz ich wykorzystanie w układach sterowania”.*

Autor rozprawy: **mgr inż. Marek Kciuk**

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

W pracy omówiono właściwości stopów z pamięcią kształtu, czyli tzw. materiałów SMA (ang. Shape Memory Alloy) oraz metody pomiaru charakterystyk i modele aktuatorów SMA. Zagadnienie naukowe zostało jasno sformułowane w rozdziale wstępnym (str. 7):

*„Celem pracy jest konstrukcja modelu matematycznego aktuatora ciągnowego wykonanego ze stopu SMA. (..) Zastosowanie modelu, to jego implementacja w układzie sterowania nowoczesnych urządzeń mechatronicznych. Model ten powinien zatem charakteryzować się dobrym odzwierciedleniem rzeczywistej charakterystyki skrócenia aktuatora w funkcji prądu nagrzewającego, przy możliwie prostej strukturze (..).”*

Teza pracy sformułowana jest następująco (str. 8):

*„Możliwe jest sformułowanie modelu matematycznego aktuatora ciągnowego SMA, z wykorzystaniem zmodyfikowanego równania Fermiego – Diraca, na podstawie pomiarowo wyznaczonych charakterystyk statycznych i dynamicznych zmiany długości aktuatora w trakcie martenzytycznej przemiany fazowej (wprost i odwrotnej).”*

Teza została udowodniona poprzez realizację czterech etapów. W pierwszym etapie Autor zaprojektował i wykonał zautomatyzowane stanowisko pomiarowe do wyznaczania

charakterystyk statycznych i dynamicznych akuatorów liniowych wykonanych ze stopów SMA. Następnie, w oparciu o ten etap, zostały przeprowadzone w szerokim zakresie badania akuatora ciągnowego F2000. Trzeci etap dotyczył opracowania modelu matematycznego akuatora SMA na podstawie wyników uzyskanych na stanowisku pomiarowym. Ostatnim etapem była implementacja opracowanego modelu w przykładowym systemie mechatronicznym poprzez symulację algorytmu sterowania akuatorem SMA.

Materiały z pamięcią kształtu są obecnie dynamicznie rozwijane i znajdują szerokie zastosowanie w wielu gałęziach nauki i przemysłu. Wynika to z ich unikalnych właściwości, które są sterowalne. Z tego względu stopy SMA mogą pracować w robotyce, jako elementy aktywne w postaci liniowych układów napędowych. Takie zastosowanie wiąże się z koniecznością ich właściwego sterowania dla uzyskania zamierzonego przemieszczenia końcówki napędu. Jedną z metod sterowania jest sterowanie z wykorzystaniem modeli matematycznych, które wymagają jednak dużej mocy obliczeniowej w układzie sterowania. Związane jest to z tym, że modele te opisują fizyczne zjawisko pamięci kształtu. Z tego względu, do celów inżynierskich, pożądany jest model opisujący makroskopowy efekt zmiany długości akuatora.

Autor podjął się zadania opracowania takiego modelu i z powodzeniem zrealizował postawioną w rozprawie tezę. Przedstawiony w pracy model oparty jest o zmodyfikowane równanie Fermiego-Diraca i w pełni spełnia przyjęte założenia.

Na uwagę zasługuje fakt, że Autor zajął się nie tylko modelowaniem, lecz również wykonaniem rozbudowanego stanowiska pomiarowego oraz przeprowadzeniem badań laboratoryjnych. Ponadto właściwa weryfikacja poprawności modelu świadczy o dużej wiedzy Autora i swobodzie poruszania się w środowisku komputerowych programów symulacyjnych.

## **2. Jaki charakter ma rozprawa /teoretyczny, doświadczalny, konstrukcyjny/?**

Praca ma charakter doświadczalno-konstrukcyjny. Przeprowadzono gruntowną analizę problemów związanych z modelowaniem i sterowaniem akuatorów wykonanych ze stopów SMA. Autor zaprojektował i wykonał skomputeryzowane stanowisko do wyznaczania charakterystyk statycznych i dynamicznych akuatorów ciągnowych SMA. Na stanowisku przeprowadzono badania laboratoryjne akuatora linowego F2000 w celu wyznaczenia jego charakterystyk eksploatacyjnych istotnych z punktu widzenia inżynierskiego. Opracowano model matematyczny akuatora SMA przy użyciu zmodyfikowanego równania Fermiego-Diraca. Autor zaimplementował opracowany model w przykładowym systemie mechatronicznym na przykładzie chwytaka do robota przemysłowego IRP4s i wykonał symulację układu sterowania tłoczkiem SMA w środowisku Matlab/Simulink.

## **3. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł /w tym literatury światowej i stanu zagadnień w przemyśle/ świadczącej o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

W pracy przeprowadzono dokładną analizę literatury krajowej i światowej. Bibliografia zawiera 64 pozycje, z czego 4 to publikacje Autora. Większość pozycji literatury jest cytowana w tekście.

Staranna analiza literatury dowodzi bardzo dobrej znajomości tematyki przez Autora. Przeprowadzenie analizy dostępnych modeli matematycznych akuatorów SMA wykazało braki w istniejącym stanie wiedzy i pozwoliło na zaproponowanie nowatorskiego rozwiązania.

#### **4. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione ?**

Postawiona teza została w pełni udowodniona. Autor przedstawił własne oryginalne rozwiązania dotyczące modelowania i pomiaru charakterystyk aktuatorów liniowych wykonanych z SMA.

W rozdziale 2 zawarty jest opis podstawowych właściwości i pojęć związanych z materiałami SMA oraz opis ich rodzajów i zastosowań. Dokonano w nim również przeglądu spotykanych modeli matematycznych stopów SMA i metod sterowania aktuatorów wykonanych ze stopów SMA. Pozwoliło to pokazać na braki w dziedzinie modelowania aktuatorów SMA.

W obszernym rozdziale 3 przedstawiono projekt i wykonanie kolejnych wersji stanowiska do badania właściwości cięgien SMA, jako aktuatorów liniowych. Opisane zostały założenia konstrukcyjne, konstrukcja mechaniczna, moduły pomiaru poszczególnych wielkości, procedury pomiarowe i przykładowe wyniki uzyskane na stanowisku. Ponadto opis końcowej wersji stanowiska został uzupełniony o informacje na temat programu sterującego pracą stanowiska napisanego przez Autora w środowisku LabView oraz informacje dotyczące niepewności pomiaru dokonywanego na stanowisku.

W rozdziale 4 znajduje się informacja o zdalnym sterowaniu programem pomiarowym podczas pomiarów dokonywanych nocą w celu minimalizacji błędów pomiarowych.

W rozdziale 5 przedstawiono procedury pomiarowe oraz wyniki pomiarów statycznych i dynamicznych charakterystyk elektromechanicznych cięgna typu F2000. Otrzymane wyniki zostały poddane wnikliwej analizie i dokładnie skomentowane.

Rozdział 6 dotyczy charakterystyki eksploatacyjnej cięgna SMA otrzymanej na bazie zmierzonych wcześniej charakterystyk i prezentującej informacje niezbędne do zaprojektowania aktuatora liniowego.

W rozdziale 7 opisane zostało oryginalne równanie Fermiego-Diraca oraz charakterystyka bazowa modelu. Przeprowadzona została analiza wyników pomiarów statycznych i dynamicznych oraz przedstawione zostały równania modelu, dobór parametrów i zastosowanie modelu w układzie sterowania.

Rozdział 8 stanowi opis systemu mechatronicznego, na przykładzie którego zweryfikowany został zaproponowany model. Przedstawione zostały wyniki przeprowadzonych symulacji algorytmu sterowania, które potwierdzają poprawność modelu.

Na koniec podsumowane zostały osiągnięcia i przedstawione zostały kierunki dalszych prac.

#### **5. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

Oryginalność rozprawy polega na opracowaniu przez Autora modelu matematycznego opisującego zmianę długości aktuatora SMA w trakcie przemiany fazowej. W odróżnieniu od istniejących modeli (termodynamicznych, histerezowych), zaproponowany model jest znacznie prostszy i może być zaimplementowany w układach sterowania o niewielkiej mocy obliczeniowej. Wyznaczenie wartości parametrów modelu jest możliwe na podstawie znajomości charakterystyk statycznych i dynamicznych. Autor zaproponował dodanie w równaniu stanu ustalonego do członu Fermiego-Diraca opisującego zasadniczą część przemiany fazowej składnika liniowego związanego ze skróceniem cięgna w początkowej i końcowej fazie przemiany. Dzięki temu możliwe było dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistych charakterystyk. Ponadto Autor opracował metodę wyznaczania

współczynnika emisyjności cięga SMA na podstawie jego charakterystyki termomechanicznej w celu uzyskania poprawnego pomiaru temperatury przy pomocy kamery termowizyjnej.

Zaproponowane rozwiązania posłużyć mogą podczas zastosowania aktuatorów SMA w praktycznych aplikacjach.

## **6. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?**

Autor starannie zaplanował strukturę każdego z rozdziałów. Wnioski wynikające z przeprowadzonego rozumowania są zwięzłe i jasne. Plan rozprawy jest w pełni zgodny z celami cząstkowymi wymienionymi we wstępie.

## **7. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?**

Recenzowana praca doktorska omawia modele aktuatorów SMA pod kątem zastosowania w układach sterowania. Zarówno część teoretyczna jak i praktyczna rozprawy nie zawiera przykładowego porównania niezbędnych zasobów sprzętowych oraz opóźnień czasowych przy wykorzystaniu różnych modeli i metod sterowania.

Sprawdzenie, które z analizowanych równań stanu statycznego najlepiej odwzorowuje zmierzoną charakterystykę zostało wykonane tylko dla jednego przykładu (ale w szerokim zakresie obciążeń mechanicznych). Brakuje sprawdzenia lub komentarza czy równanie z dodanym członem liniowym zapewnia najmniejszy błąd aproksymacji także dla innych obciążeń i różnych typów cięgien SMA.

Autor nie podał, w jaki sposób wyznaczone zostały wartości współczynników  $K$ ,  $i_0$ ,  $p$  dla równań stanu statycznego cięga F2000. Czy zastosowana została optymalizacja Hooke'a-Jeevesa wspomniana dalej przy opisie doboru współczynników równań stanu dynamicznego i czy zastosowano to samo kryterium optymalizacji?

Autor nie dodał w równaniach stanu dynamicznego opartych o zmodyfikowane równanie Fermiego-Diraca członu wielomianowego lub stałej. Zabieg ten mógłby skorygować błędy początkowej zmiany długości, które są szczególnie istotne dla niewielkich prądów wymuszających.

W punkcie 10 zawarłem uwagi szczegółowe. Dodatkowo mam następujące uwagi:

- ⇒ Autor stosuje w nadmiarze przecinki.
- ⇒ Symbole w tekście nie zawsze są zapisane kursywą.
- ⇒ W spisie literatury brakuje pełnych danych niektórych artykułów (nr woluminu, strony, nazwa czasopisma/konferencji), np. [A.5], [A.14]. Brak jest jednolitego systemu zapisu. Numer odnośnika [A.37] jest użyty w spisie dwukrotnie.
- ⇒ Rozprawa powinna być uzupełniona o schematy elektryczne opisywanych modułów stanowiska pomiarowego, które były wykonane samodzielnie przez Autora.

## **8. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?**

**Czy i jaka jest przydatność praktyczna rozprawy dla gospodarki narodowej?**

Rozprawa porusza ważne zagadnienia z zakresu implementacji aktuatorów SMA. Autor zaprojektował i wykonał uniwersalne, zautomatyzowane stanowisko pomiarowe do badania aktuatorów cięgowych SMA, które po odpowiednim przystosowaniu może być używane do badania także innych typów lekkich aktuatorów liniowych. Opracowany



i zweryfikowany przez Autora model aktuatora ciągnowego może posłużyć do implementacji w układach sterowania o niewielkiej mocy obliczeniowej.

## 9. Ocena końcowa

Rozprawa mgr. inż. Marka Kciuka ma charakter doświadczalno-konstrukcyjny, a sposób rozwiązania problemów świadczy o głębokiej wiedzy Doktoranta w zakresie projektowania, modelowania i konstruowania systemów mechatronicznych. Autor wykazuje dobrą znajomość literatury z dziedziny stopów z pamięcią kształtu i umiejętność jej twórczego wykorzystania. Teza została udowodniona, a cel rozprawy osiągnięto przy użyciu właściwych metod badawczych.

W konkluzji stwierdzam, że praca mgr. inż. Marka Kciuka pt.: „*Badania pomiarowe i modele aktuatorów SMA, uwzględniające zjawiska elektro-termo-mechaniczne oraz ich wykorzystanie w układach sterowania*” spełnia wymagania *Ustawy o tytule i stopniach naukowych* stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony. Ze względu na bardzo duże praktyczne znaczenie wyników rozprawy stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

## 10. Uwagi szczegółowe:

Nr str.	Nr wiersza	Jest	Powinno być / komentarz
7	14 od góry	tworzenie modelu	konstruowanie modelu
10	12 od góry	swobodnego.	swobodnego).
13	Rys. 2.4	<b>Rysunek mało czytelny</b>	
14	1 od góry	układ sił	stosunek sił
14	13 od dołu	tabeli Tabela 1	tabeli 1
15	1 od dołu	normy, określające metody wytwarzania, ani badania	normy określające metody wytwarzania ani badania <b>(interpunkcja)</b>
16	Rys. 2.6	<b>Brak polskich opisów przy osiach</b>	
16	13 od dołu	tą zaletę	tę zaletę <b>(styl)</b>
18	11 od dołu	jest 100 % stanu martenzytu	jest 100% zawartość frakcji martenzytu
20	11 od dołu	tworzone są nowe modele	konstruowane są nowe modele
26	Rys. 2.10	<b>Rysunek nieczytelny</b>	
27	8 od dołu	przerwanie odvodu wrywając wtyk z gniazda	przerwanie odvodu poprzez wyrwanie wtyku z gniazda
27	1 od dołu	Wg autorów	Według autorów <b>(styl)</b>
34	Tabela 4	<b>Tabela analogiczna do tabeli w aneksie</b>	
36	8 od dołu	nagrzewającego i ciągną	nagrzewającego ciągną
38	3 od góry	ciągną, oraz moduł	ciągną oraz moduł <b>(interpunkcja)</b>
41	7 od dołu	ilości impulsów	liczby impulsów
43	8 od góry	wymuszeniem, lub wielkością	wymuszeniem lub wielkością <b>(interpunkcja)</b>
44	9 od góry	obciążeniu siłą $F = 0,5185 \text{ kg}$	obciążeniu siłą $F = 0,5185 \text{ kG}$ <b>lub</b> $F = 5,0865 \text{ N}$
48	Równ. (5)	$u = R \cdot i$	$u = R_0 \cdot i$ <b>(zgodność z opisem)</b>
49	8 od góry	CETRONIX	CENTRONIX

51	11 od góry	kamera	Kamera
53	2 od dołu	$\geq 0,2\% + 10 \text{ mA}$	$\leq 0,2\% + 10 \text{ mA}$
58	3 od góry	między obiektem, a obiektywem	między obiektem a obiektywem <i>(interpunkcja)</i>
63	8 od dołu	zbliżoną temperatury	zbliżoną do temperatury
63	3 od dołu	multimetry, oraz zasilacz	multimetry oraz zasilacz <i>(interpunkcja)</i>
64	5 od dołu	danych, lub rzeczywistych	danych lub rzeczywistych <i>(interpunkcja)</i>
64	3 od dołu	tworzy się równocześnie program wykonywalny	program jest równocześnie kompilowany do pliku wykonywalnego <i>(styl)</i>
66	4 od góry	na rysunku 3.21	na rysunku 3.22
68	2 od dołu	ze wzoru (5)	ze wzoru (10)
80	3 od dołu	oporowym, lub stygnięciem	oporowym lub stygnięciem <i>(interpunkcja)</i>
83	3 od góry	$F = 0,675 \text{ kg} - L_0 = 378,6 \text{ mm}$	$F = 0,675 \text{ kg} ; L_0 = 378,6 \text{ mm}$
83	Rys. 5.5	<b>Brak pokazania przedziałów na rysunku</b>	
86	10 od dołu	nie obciążonego	Nieobciążonego
93	Rys. 5.13a	<b>Powtórzenie rysunku 3.28</b>	
97	2 zdanie od góry	<b>Za długie (niejasne) zdanie</b>	
103	Opis równ. (16) i (17)	<b>Brak <math>K_p</math> w równaniach; <math>K_a, K_m</math> nie opisane</b>	
103	11 od dołu	W omawianym artykule	<b>Który artykuł Autor ma na myśli? [A.34] ?</b>
112	5 od dołu	Na rysunku 7.7	Na rysunku 7.6
114	3 od góry	W celu wyboru funkcji, która (...) Rozpatrywano	W celu wyboru funkcji, która (...), rozpatrywano
114	Rys. 7.7	<b>Pojedynczy przebieg zwiększyłby czytelność rysunku</b>	
118	Tabela 9	<b>Brak jednostek dla podanych wartości parametrów <math>K, t_0, p, T_1, T_2</math></b>	
119	3 od góry	jest równy zero	ma wartość zero <i>(styl)</i>
119	10 od góry	badania były robione	badania były przeprowadzone <i>(styl)</i>
120	6 od góry	na rysunku 7.11	na rysunku 7.10
122	4 od góry	zmniejsza się, dla małych obciążeń	zmniejsza się, dla małych obciążeń <i>(interpunkcja)</i>
126	14 od góry	nie możliwych	Niemożliwych
126	5 od dołu	stopień robota	stopień swobody robota
129	4 od góry	w zamian za ciągną	zamiast ciągnięć <i>(styl)</i>
129	Rys. 8.3	<b>Rysunek mało czytelny; brak polskich opisów</b>	
129		w tabeli Tabela 10	w tabeli 10
130	Rys. 8.4	<b>Brak punktów <math>T_1</math> i <math>S_1</math>; brak odległości <math>r_{SX}, r_{TY}, r_{C2}</math>; niezgodność oznaczeń <math>r_{PI}</math> i <math>r_{CI}</math> z opisem</b>	
130	2 od dołu	z zasady zachowania momentu	z zasady zachowania momentu siły
132	Równ. (51)	<b>Prosta powinna przebiegać przez punkt (0,0) aby <math>F = 0</math> dla <math>\Delta L = 0</math></b>	
134	4 od dołu	microswich	Microswitch
136	1 od dołu	skorygować tą	skorygować tę <i>(styl)</i>

139	11 od dołu	waga aktuatorów, oraz	waga aktuatorów oraz <i>(interpunkcja)</i>
139	9 od dołu	lżejsza, niż	lżejsza niż <i>(interpunkcja)</i>
142	5 od góry	jest stała, i na tyle	jest stała i na tyle <i>(interpunkcja)</i>
145	13 od góry	tą możliwość	tę możliwość <i>(styl)</i>

A. Kapke

-----  
podpis