

Koncepcja formułowania modelu matematycznego aktuatora ciągnowego SMA na podstawie charakterystyk elektro-mechanicznych

Idea of SMA Wire Actuator Modeling Based on its Electro-Mechanical Characteristics

Marek Kciuk, *Politechnika Śląska*
(19.04.2009, prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński)

Abstract

The goal of this article is presenting results of PhD thesis. Article presents idea of measuring and modeling SMA wire actuators. Laboratory stand is briefly presented in Fig. 2 and Fig. 3. Measurement results are presented in Fig. 4 and Fig. 5. Mathematical model of SMA actuator is based on modified Fermi – Dirac equation. Modified Fermi – Dirac equation is shown in (2). Hysteresis behavior of SMA is described by two steady-state equations with different parameters. Controlling value is heating current, disturbance is bias force, output is length reduction. Hook'e – Jeeves optimization algorithm was used to calculate parameters of steady state and dynamic equations. Fig. 6. presents approximation of I_0 steady-state equations parameters. Equ. (4) and (5) approximate I_0 parameter vs. bias force. Hysteresis is described by equ. (6). Proposed model is simpler than Praisach model or models based on thermodynamic law. It is possible to use it in simple controlling units. It is possible to use full or steady-state model.

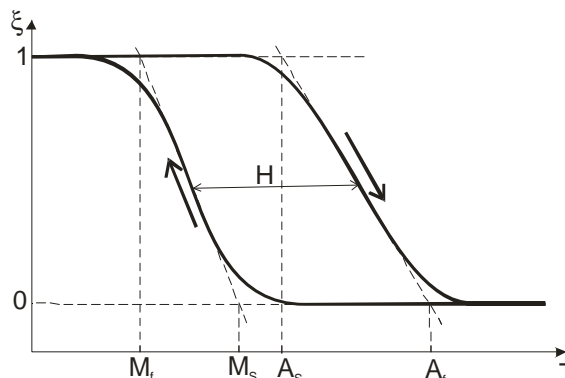
Streszczenie

Niniejszy referat przedstawia koncepcję formułowania modelu matematycznego aktuatora SMA na podstawie pomiarowo wyznaczonych charakterystyk statycznych i dynamicznych. Proponowany model jest typu wejście-wyjście. Równaniem bazowym modelu jest zmodyfikowane równanie Fermiego – Diraca. W celu opisu histerezy zjawiska zmiany kształtu zaproponowano wprowadzenie dwóch równań opisujących stan statyczny aktuatora różniących się współczynnikami. Proponowany model jest prostszy, niż modele termodynamiczne lub histerezy i może znaleźć zastosowanie w układach sterowania systemów napędzanych aktuatorami SMA.

1. Wprowadzenie

Stopy z pamięcią kształtu (SMA) należą do materiałów typu SMART czyli materiałów o sterowalnych właściwościach. Zmiana kształtu jest wtórnym efektem zmiany wewnętrznych naprężeń mechanicznych, następujących w wyniku przemiany fazowej. Bodźcem wywołującym przemianę fazową jest energia cieplna lub. Przemiana fazowa zachodząca wewnątrz struktury materiału to odwracalna **przemiana martenzytyczna** [2]. W fazie niskotemperaturowej zwanej **fazą martenzytu** ułożenie cząsteczek jest jednoskośne, a siatka krystalograficzna nie wykazuje cech symetrii. W wyniku tego materiał łatwo poddaje się plastycznym odkształceniom mechanicznym. W fazie wysokotemperaturowej - **austenicie** siatka krystalograficzna wykazuje dużą symetrię, a materiał nabiera cech sprężystych oraz wykazuje bardzo dużą sztywność [2].

Przebieg termicznie aktywowanej przemiany martenzytycznej przedstawia wykres z rysunku 1.



Rys. 1. Zawartość frakcji martenzytu w stopie SMA, w funkcji temperatury $\xi = f(T)$.

Fig. 1. Martensitic phase transition, fraction of martensite $\xi = f(T)$.

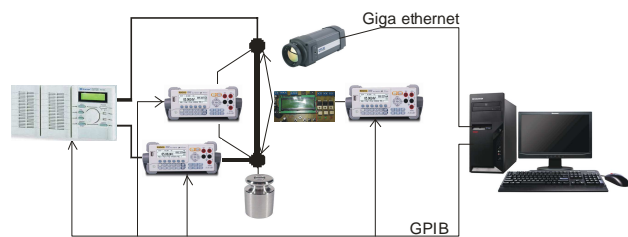
Proces przemiany fazowej nie zachodzi w stałej temperaturze. Wyróżnić można cztery wartości temperatury, istotne z punktu widzenia przemiany: A_s i A_f – początkowa i końcowa temperatura przemiany martenzytu w austenit, M_s i M_f – początkowa i końcowa temperatura przemiany austenitu w martenzyt.

Przy przemianie martenzytycznej wprost czyli od fazy austenitu do martenzytu i przy braku obciążeń mechanicznych materiał zachowuje swój kształt. Ta postać martenzytu nazywa się **martenzytem zbliźnionym**. W przypadku istnienia obciążeń mechanicznych materiał przyjmuje kształt wymuszony przez siłę obciążającą. Postać ta nosi nazwę **martenzytu odkształconego**. Istotą zjawiska pamięci kształtu jest powrót materiału do swojego naturalnego kształtu w trakcie przemiany martenzytycznej odwrotnej, pomimo istnienia obciążeń mechanicznych.

2. Stanowisko pomiarowe

W celu realizacji badań cięgien SMA, nagrzewanych oporowo prądem, zostało zaprojektowane i wykonane stanowisko pomiarowe. Umożliwia ono prowadzenie pomiarów cięgien SMA w stanach statycznych oraz rejestrację procesów zachodzących w stanach dynamicznych. Wielkości poddane pomiarom można podzielić na trzy grupy: elektryczne, mechaniczne i cieplne. Mierzonymi wielkościami elektrycznymi są: prąd nagrzewający cięgno I oraz napięcie pomiędzy zaciskami cięgna U . Wielkością mechaniczną jest zmiana długości cięgna (jego skrócenie lub – inaczej – ubytek jego długości ΔL , spowodowany przepływającym prądem I). Wielkością cieplną jest temperatura cięgna T [1].

Na rysunku 2. przedstawiono ideę budowy systemu pomiarowego. Wszystkie przyrządy pomiarowe pracują w sieci GPIB (standard IEEE 488.2). Urządzeniem nadrzędnym w systemie pomiarowym jest komputer PC. Kamera komunikuje się z komputerem za pomocą sieci Ethernet. Podłączenie komputera do Internetu umożliwia zdalną realizację pomiarów.

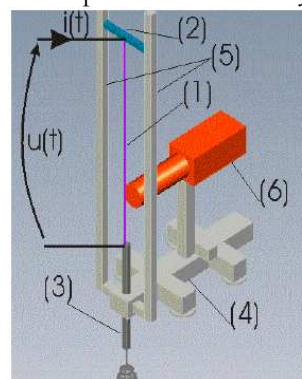


Rys. 2. Idea budowy stanowiska pomiarowego.
Fig. 2. Measurement system.

Jako elementy systemu pomiarowego pracują: zasilacz laboratoryjny PSH-3620A, multimetry laboratoryjne Rigol DM3052 oraz kamera termowizyjna Flir A325.

2.1. Konstrukcja mechaniczna stanowiska

Konstrukcja mechaniczna stanowiska pomiarowego została przedstawiona na rysunku 3.



Rys. 3. Model stanowiska pomiarowego.

- | | |
|----------------------|----------------------------|
| (1) – badane cięgno, | (4) – podstawa stanowiska, |
| (2) – poprzeczka, | (5) – pionowa rama, |
| (3) – ruchomy tłok, | (6) – kamera termowizyjna. |

Fig. 3. 3D view of laboratory stand.

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| (1) – SMA wire, | (4) – base, |
| (2) – mounting point, | (5) – vertical frame, |
| (3) – moving piston, | (6) – infrared camera. |

2.2. Pomiar temperatury

Istotnym problemem jest pomiar temperatury bardzo małego obiektu. Jako rozwiązanie zastosowano kamerę termowizyjną A325 firmy flir z makrosoczewką (Close-up x1) o rozdzielczości powierzchniowej obrazu 25 μm i częstotliwości odświeżania 60 Hz.

Zmierzono współczynnik emisyjności dwoma metodami.

Metoda pierwsza – autorska, polegała na przeprowadzeniu serii pomiarów statycznych, przy różnych nastawach współczynnika emisyjności, a następnie wybraniu tej wartości, przy której temperatury charakterystyczne przemiany są zgodne z temperaturami podanymi przez producenta w nocie katalogowej. Wybrano współczynnik emisyjności równy 0,33.

Metodę tą zweryfikowano za pomocą metody drugiej – metody porównania z wzorcem. Jako wzorzec zastosowano taśmę o znanej emisyjności (równej 1). Współczynnik emisyjności cięgna dobrano w taki sposób, aby temperatury cięgna i taśmy były sobie równe. Wykonano serię pomiarów dla różnych wartości temperatur. Średni współczynnik emisyjności wynosi 0,339.

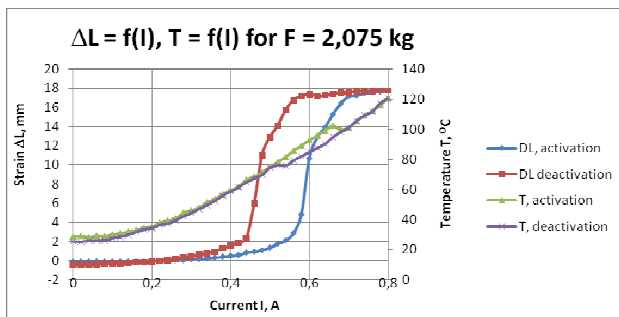
Porównanie zmierzonych wartości współczynnika emisyjności badanego cięgna wykazało zadowalającą zgodność wyników otrzymanych za pomocą obydwu metod. Jest to jednocześnie potwierdzenie skuteczności metody autorskiej.

3. Badania cięgien SMA

W ramach pracy zrealizowano szeroki program badań wybranego aktuatora. Wyznaczono doświadczalnie:

- statyczną charakterystykę skrócenia cieżna w funkcji prądu, przy różnych wartościach obciążenia mechanicznego: $\Delta L = f(I)$ przy $F = const$,
- statyczną charakterystykę temperatury w funkcji prądu, przy różnych stałych wartościach obciążenia mechanicznego $T = f(I)$ przy $F = const$,
- statyczną charakterystykę skrócenia cieżna w funkcji przyłożonej siły, przy różnych wartościach prądu $\Delta L = f(F)$ przy $I = const$,
- charakterystyki dynamiczne zmiany długości cieżna, przy stałym obciążeniu mechanicznym, przy skokowym załączeniu (i wyłączeniu) prądu $\Delta L = f(t)$ przy $F = const$ oraz przy $i(t) = I_{MAX} \cdot 1(t)$, dla różnych wartości I_{MAX} .

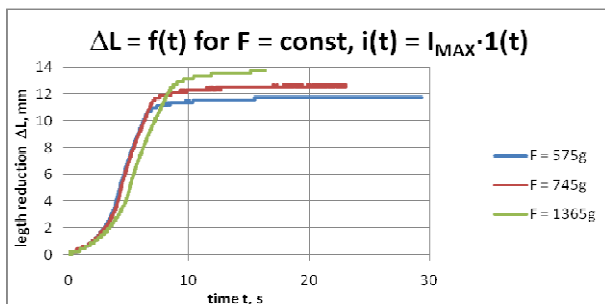
Przykładowa charakterystyka statyczna, z uwzględnieniem pętki histerezy została przedstawiona na rys 4.



Rys. 4. Charakterystyka statyczna skrócenia oraz temperatury w funkcji prądu nagrzewającego.
Fig. 4. Static characteristics of shortening and temperature of an actuator.

Wykonując pięć serii pomiarowych dla tych samych warunków wymuszenia i obciążenia sprawdzono powtarzalność wyników. W wyniku pracy określono warunki kalibracji cieżna jako aktuatora liniowego. Powtarzalność wyników uzyskuje się po dwóch pełnych cyklach aktywacji i dezaktywacji aktuatora.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe przebiegi dynamiczne w trakcie procesu aktywacji, przy jednakowym obciążeniu mechanicznym oraz przy różnych wartościach prądu nagrzewającego. Pełna aktywacji zachodzi przy $I = 0,8A$, natomiast przy $I = 0,5A$ nie dochodzi do aktywacji siłownika.



Rys. 5. Charakterystyka dynamiczna skrócenia aktuatora, przy skokowym załączeniu prądu.
Fig. 5. Dynamic characteristics of shortening switched on actuator

4. Model matematyczny aktuatora F2000

Adaptacja równania Fermiego – Diraca do opisu zachowania aktuatora wykonanego ze stopu SMA wydaje się być uzasadniona i ma odzwierciedlenie w literaturze [3]. Podstawowe równanie Fermiego – Diraca ma postać (1):

$$P = P(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \quad (1)$$

Istnieje pewne podobieństwo tego zjawiska do przebiegu przemiany martenzytycznej. Dwoóm zmiennym niezależnym – energii poziomu i temperaturze w równaniu Fermiego – Diraca odpowiadają wartość prądu nagrzewającego i obciążenie mechaniczne aktuatora SMA.

Istotnym zjawiskiem, jakiego nie uwzględnia równanie Fermiego – Diraca jest histereza wynikająca z różnego przebiegu zjawiska aktywacji oraz dezaktywacji aktuatorów SMA. Zaproponowano uwzględnienie pętki histerezy w modelu poprzez wprowadzenie oddzielnych równań odpowiadających dwóm możliwym kierunkom działania siły wymuszającej. Szerokość pętki histerezy jest w tym modelu opisana jako różnica określonych współczynników w równaniach opisujących stan statyczny aktuatora.

Przystąpiono do badania przebiegu funkcji, przy określonych zmianach jej współczynników. Zmodyfikowane równanie dane jest wzorem (2):

$$y = f(x) = \frac{K}{1 + \exp(p \cdot (x_0 - x))} \quad (2)$$

gdzie:

K – współczynnik maksymalnej zmiany wartości zmiennej y ,

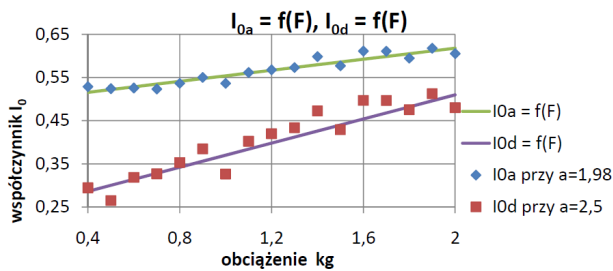
x_0 – wartość zmiennej niezależnej x , przy której $y = 1/2 K$,

p – współczynnik stromości charakterystyki.

W celu lepszej aproksymacji charakterystyk statycznych zaproponowano równania będące sumą równania Fermiego – Diraca oraz wielomianu stopnia pierwszego (3).

$$\Delta L(I) = \frac{K}{1 + \exp(p \cdot (I_0 - I))} + a \cdot I \quad (3)$$

Za pomocą algorytmu optymalizacyjnego (metodą Hooke'a – Jeevesa) dobrano współczynniki równań opisujących stan statyczny oraz dynamiczny aktuatora [4, 5]. W dalszym etapie prac wyznaczono wpływ siły obciążenia na wartość współczynników w równaniach. Na rysunku 6 przedstawiono wartości współczynników I_0 równań statycznych w funkcji obciążenia mechanicznego aktuatora oraz ich aproksymację.



Rys. 6. Wartości współczynników I_0 dla aktywacji i dezaktywacji aktuatora.

Fig. 6. Factor I_0 in equ. (3) for activation and deactivation of SMA actuator.

Równania aproksymujące wartości współczynników I_{0a} oraz I_{0d} dane są wzorami (4) i (5).

$$I_{0a}(F) = 0,064 \cdot F + 0,49 \quad (4)$$

$$I_{0d}(F) = 0,14 \cdot F + 0,23 \quad (5)$$

Szerokość pętli histerezy jest w tym modelu określona różnicą wartości współczynników I_0 dla obydwu kierunków działania wymuszenia (6).

$$H = I_{0a} - I_{0d} |_{F=const} \quad (6)$$

W wyniku otrzymano model składający się z czterech równań z dwoma zmiennymi niezależnymi. W przypadku równań dla stanu statycznego wielkościami wejściowymi są: prąd nagrzewający aktuator oraz obciążenie mechaniczne. W przypadku równań dla stanu dynamicznego wielkościami wejściowymi są czas i obciążenie mechaniczne.

Podsumowanie

W celu zaimplementowania pełnego algorytmu sterowania aktuatorami SMA wymagana jest znajomość wszystkich czterech równań modelu: dwóch dla stanu statycznego – w celu wyliczenia wartości prądów nagrzewających – utrzymujących stałą pozycję oraz dwóch dla stanu dynamicznego – w celu wyliczenia czasu niezbędnego do osiągnięcia pozycji. W układzie sterowania można zaimplementować pełny model matematyczny, lub model uproszczony – statyczny. Implementacja uproszczonego modelu wymaga mniejszej mocy obliczeniowej układu sterowania, lecz nie umożliwia obliczania czasu wymaganego do wykonania przemieszczenia końcówki roboczej aktuatora.

Model zweryfikowano poprzez symulację w układzie sterowania chwytaka napędzanego aktuatorami SMA, zaprojektowanego i wykonanego jako narzędzie chwytające do robota IRP4s znajdującego się w Katedrze Mechatroniki. Pracę układu sterowania zasymulowano w programie Matlab/Simulink.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2010 jako projekt badawczy nr N N510 353036

Literatura

1. Kciuk M., Kłapyta G.: *Koncepcja stanowiska pomiarowego do wyznaczania charakterystyk elektro-termo-mechanicznych stopów z pamięcią kształtu (SMA)*. Materiały XIII Symposium „Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i Mechatroniki” PPEEm 2009 pod patronatem Komitetu Elektrotechniki PAN, Wisła 14-17.12.2009, str. 242-247.
2. Ziółkowski A. *Pseudoelastyczność stopów z pamięcią kształtu badania doświadczalne i opis teoretyczny*. Praca habilitacyjna, IPPT PAN, Warszawa 2006.
3. Jayender J., Patel R. V., Nikumb S., Ostojic M.: H_∞ loop shaping controller for Shape Memory Alloy Actuators. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005, Seville, Spain, December 12-15, 2005.
4. Kalinowski K.: *Metody optymalizacji*. Zakład Poligraficzny Waldemar Wiliński, Gliwice, 2000.
5. Kowol P.: *Polowa analiza wpływu właściwości cieczy magneto-reologicznej i kształtu tarcz na parametry sprężgła magneto-reologicznego*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne BOBRME KOMEL, z. 88/2010, Katowice 2010, s. 229-233

Adres służbowy Autora:



dr inż. Marek Kciuk
Politechnika Śląska
Wydział Elektryczny
Katedra Mechatroniki
ul. Akademicka 10
44-100 Gliwice
tel. (32) 237 28 03
fax (32) 237 27 01

email: marek.kciuk@polsl.pl