# STANOWISKO POMIAROWE DO WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK ELEKTRO-TERMO-MECHANICZNYCH AKTUATORÓW SMA

## MEASURING SYSTEM FOR TAKING SMA ELEKTRO-TERMO-MECHANICAL CHARACTERISTICS

Marek Kciuk, Politechnika Śląska

## Abstract

The goal of this paper is to present the idea of Shape Memory Alloy wires measurement system. Measurement system is described shortly in paragraph 2. Test series including static (Figs. 3 - 5) and dynamic measurement (Figs. 6, 7) are presented in paragraph 3. Electro-mechanical characteristics were measured ( $\Delta L$ = f(I)). The last paragraph contains an analysis of the results. Complete measurement system will be working automatically, system will be controlled by PC computer with LabVIEW.

#### Streszczenie

W artykule zaproponowano konstrukcję stanowiska do badania charakterystyk statycznych i dynamicznych aktuatorów cięgnowych SMA oraz przedstawiono i przeanalizowano kilka serii testowych wykonanych w celu sprawdzenia działania stanowiska.

## 1. Wprowadzenie

Stopy z pamięcią kształtu (Shape Memory Alloy, SMA) należą do nowoczesnej grupy materiałów typu SMART. Efekt pamięci kształtu (Shape Memory Effect, SME) jest rezultatem odwracalnej przemiany martenzytycznej. Jest to przemiana fazowa typu ciało stałe – ciało stałe. Materiał SMA może znajdować się w jednej z dwóch faz, fazie austenitu lub fazie martenzytu. Faza austenitu jest fazą wysokotemperaturową, W której struktura cząsteczkowa jest jednorodna, uporządkowana, kubiczna, dzięki temu materiał jest sztywny i mało podatny na odkształcenia. W fazie austenitu struktura krystalograficzna nie jest uporządkowana, materiał można łatwo deformować, występuje on w dwóch formach - martenzyt zbliźniaczony (w którym kształt makroskopowy jest taki sam jak w fazie austenitu) lub martenzyt odkształcony. W trakcie przemiany

martenzytycznej odwrotnej (z martenzytu w austenit), w stopie SMA wytwarzają się duże siły, które wymuszają powrót materiału do swojego naturalnego kształtu. Kształt ten jest nadawany w fazie produkcji. Proces przemiany fazowej nie jest izotermiczny, oraz występuje w nim pętla histerezy, dodatkowo jest zależny od wewnętrznych naprężeń, które można regulować zmieniając obciążenie mechaniczne materiału SMA. Przykłady charakterystyk przemiany fazowej podane są w dalszej części artykułu.

Aktuatory wykonane stopów ze SMA charakteryzują się dużą siłą na jednostkę masy, brakiem dodatkowych przekładni, niewielką wagą, praca beziskrowa, biokompatybilnościa. Pracuja najczęściej jako aktuatory w ruchu liniowym. W robotyce stosuje się je w konstrukcjach makro i mikroskopowych. W konstrukcjach makroskopowych stosuje się je w rozwiązaniach, gdzie dynamika nie ma dużego znaczenia - takich jak: sztuczne ręce oraz (dzięki biokompatybilności) protetyka, sztuczne twarze, roboty o wielu stopniach swobody, roboty sieciowe (net robots), roboty kroczace.

Jedną z metod dostarczania ciepła potrzebnego do przemiany fazowej jest grzanie oporowe. W wyniku przepływu prądu elektrycznego przez aktuator wytwarza się w nim ciepło zgodnie z prawem Joule'a – Lenza. Inną metodą dostarczenia energii ciepłnej jest użycie ogniw Peltier'a. Podstawową zaletą pierwszego rozwiązania jest jego prostota oraz niski koszt, dlatego jest często stosowane. Drugie rozwiązanie jest bardziej skomplikowane, umożliwia jednak zastosowanie ogniw nie tylko do grzania ale także do aktywnego chłodzenia, co znacznie poprawia dynamikę oraz uniezależnia układ od zmian rezystancji elementu wykonawczego SMA [6].

## 2. Stanowisko pomiarowe

Projekt konstrukcji mechanicznej stanowiska pomiarowego został szerzej opisany w [1, 2]. Jako wymuszenie prądowe zastosowano zasilacz GwInstek PSH-3620A o parametrach maksymalnych 36V i 20A. Pomiary wielkości elektrycznych pomocą multimetrów realizowane są za laboratoryjnych Rigol DM 3052, zaś pomiar odkształcenia, za pomocą scalonego optycznego Q9874, umożliwiającego czujnika pomiar przemieszczenia (odkształcenia) z dokładnością do 0,085mm oraz kierunku ruchu. Impulsy generowane przez czujnik zliczane są w mikrokontrolerze ATmega88 dokonującym dodatkowo pomiarów



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego do badania aktuatorów SMA.

Fig. 1. Block diagram of measurement system.





Rys. 2. (a) Schemat układu konwersji przemieszczenia na napięcie,

(b) schemat blokowy czujnika Q9874,

(c) przykład sygnału wyjściowego czujnika.

Fig. 2. (a) schematic diagram of  $\Delta L/U$  converter,

temperatury otoczenia. Wynik pomiaru wyświetlany jest na wyświetlaczu LCD. W celu sprzężenia pomiaru odkształcenia z pomiarami wielkości elektrycznych (prąd i napięcie) mikrokontroler generuje sygnał PWM o wypełnieniu proporcjonalnym do odkształcenia. Na rysunku 1 przedstawiono blokowo konstrukcję stanowiska pomiarowego, na rysunku 2 przedstawiono konstrukcję układu realizującego pomiar odkształcenia. Pomiar temperatury aktuatora realizowany będzie za pomocą kamery termowizyjnej A325 firmy FLIR z obiektywem makro o rozmiarze pojedynczego piksela 25µm.

Stanowisko może być sterowane z komputera PC za pomocą interfejsu GPIB oraz środowiska LabVIEW, i docelowo będzie pracować autonomicznie.

## 3. Pomiary testowe

Dokonano serii próbnych pomiarów ręcznych. Badania statyczne przeprowadzono według następującego algorytmu:

- ustawienie żądanej wartości prądu,

nagrzanie (schłodzenie) aktuatora przez określony czas (5 – 7 min)

- odczytanie wskazań przyrządów.

Pomiarów dokonano w obydwu kierunkach (zwiekszanie pradu od 0 do I<sub>max</sub>, zmniejszanie pradu

od I<sub>max</sub> do 0). Punktem startowym pojedynczej serii pomiarowej była wartość prądu 0 (kierunek działania grzanie – chłodzenie) lub wartość  $I_{\text{max}}$ (kierunek działania chłodzenie grzanie). Obiektem badania bvł aktuator F0930V045 o uciagu znamionowym  $F_N = 930g$  [3], znamionowym napięciu  $U_{\rm N} = 4,5V,$ prądzie maksymalnym I<sub>max</sub> = 1A. Aktuator testowy przeszedł wcześniej serie około 30 000

serii grzania i chłodzenia w próbie zmęczeniowej.

Badania dynamiczne przeprowadzono rejestrując na oscyloskopie tylko przebieg z czujnika odkształcenia.

Rysunki 3, 4 oraz 5 przedstawiają charakterystyki statyczne odkształcenia w funkcji prądu  $\Delta L = f(I)$ (charakterystyka elektromechaniczna). Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pierwszej serii pomiarowej. Obciążenie mechaniczne 186g, temperatura otoczenia 28°C, kierunek działania grzanie-chłodzenie. Dodatkowo wykres przedstawia charakterystykę rezystancji w funkcji prądu R = f(I). Rysunek 4 przedstawia wyniki dwóch pomiarów przy

<sup>(</sup>b) block diagram of Q9872 sensor,(c) output signal of sensor.







Fig. 4. Electro mechanic characteristics of SMA,  $\Delta L = f(I)$ , two values of mechanical bias load,





Rys. 5. Porównanie statycznych charakterystyk elektromechanicznych aktuatora SMA podczas grzania przy różnych obciążeniach mechanicznych.

Fig. 5. Comparison of static characteristics, heating way, different bias loads.



Rys. 6. Charakterystyka odkształcenia aktuatora SMA  $\Delta L = f(t)$ , podczas chłodzenia lapidarnego.

Fig. 6. Strain of SMA actuator  $\Delta L = f(t)$ , concise cooling.



Rys. 7. Charakterystyka odkształcenia aktuatora SMA ΔL = f(t), podczas grzania oporowego.
 Fig. 7. Strain of SMA actuator ΔL = f(t), Joule's heating.

obciążeniu odważnikiem 0,5kg (całkowita masa wynosi m = 0,686kg), oraz przy obciążeniu 1kg (całkowita masa obciążenia wynosi m = 1,186kg). W drugim przypadku aktuator został mechanicznie przeciażony o 27%. Temperatura otoczenia podczas wszystkich serii pomiarowych mieściła się w zakresie °C. 27±2 Rysunek 5 przedstawia charakterystykę  $\Delta L = f(I)$  Przy różnych obciążeniach mechanicznych. Dokładne obciążenie mechaniczne wynosi m<sub>obc</sub>=186g+m, gdzie 186g to masa ruchomego tłoka. Rysunki 6 oraz 7 przedstawiają wyniki pomiarów dynamicznych przy wymuszeniu skokiem jednostkowym prądu (załączeniem lub wyłączeniem prądu o podanej wartości.

#### 4. Analiza wyników oraz wnioski

Z pierwszego wykresu (Rysunek 3) wynika, iż istnieje minimalna wartość mechanicznej siły obciążenia, powodująca odkształcenie postaciowe aktuatora. Obciążenie siłą równą 20% F<sub>N</sub> nie spowodowało odkształcenia postaciowego podczas przejścia ze stanu austenitu do martenzytu. Rys. 3.

Ciekawym zachowaniem było kurczenie się siłownika podczas obniżania prądu. Zjawisko to

zaobserwowano także na charakterystykach przedstawionych na rysunku 4. Podczas zmniejszania

wartości prądu w pierwszej fazie chłodzenia aktuator kurczy się. Należałoby sprawdzić, czy podobnie zachowają się inne aktuatory SMA.

Na rysunku 5 widać wpływ obciążenia mechanicznego na zmianę charakterystycznych punktów przemiany martenzytycznej. Widać, że wraz ze wzrostem obciążenia charakterystyka przesuwa się w stronę wyższych prądów, co jest zgodne z literaturą [4, 5]. Jednak charakter zmian przy wymuszeniu prądowym nie jest jednoznaczny z charakterem zmian przy wymuszeniu termicznym, w którym jest on liniowy przy zachowaniu stałości pętli histerezy. Należałoby w zasadniczej fazie badań określić charakter zmian przy wymuszeniu prądowym.

Badania dynamiczne pozwoliły określić czasy nagrzewania i stygnięcia siłownika. Pozwoli to skorygować te czasy podczas następnych prób statycznych. Z wykresów przedstawionych na rysunkach 6 oraz 7 wynika, że czas chłodzenia można przyjąć ok. 2 min, czas grzania ok. 30 sekund lub wprowadzić warunek pozycji stabilnej oraz przejścia następnego punktu pomiarowego, do jeżeli odkształcenie nie ulegnie zmianie w czasie 5s dla grzania lub 20s dla chłodzenia. Podane wyżej czasy obowiązują dla cięgna o grubości 0,254mm, dla cięgien o innych grubościach trzeba odpowiednio zmienić czasy.

Należy przyjąć stały, jednolity sposób określania długości aktuatora. Ponieważ stop SMA przyjmuje kształt niezdeformowany w fazie austenitu, przy zerowym obciążeniu mechanicznym przygotowanie do badania statycznego wymaga zachowania poniższego algorytmu: zasilenie nieobciążonego aktuatora aby osiągnął fazę austenitu, wyzerowanie miernika odkształcenia, obciążenie aktuatora żądaną siłą mechaniczną.

Z wykresów przedstawionych na rysunkach 3, 4, 5, widać, że zmiana odkształcenia następuje gwałtownie. Może się okazać niezmiernie trudnym zadanie utrzymywanie dokładnie zadanej długości cięgna. Duży wpływ będą miały zmieniające się w czasie warunki otoczenia, głównie temperatura.

Celem badań zasadniczych będzie wyznaczenie charakterystyki elektro-termo-mechanicznej umożliwiającej pozycjonowanie aktuatorów. Oraz sprawdzenie możliwości określenia stanu i pozycji aktuatora za pomocą zmian rezystancji (rys. 3).

## Bibliografia

[1] Kciuk M.: Computer based measurement system for Shape Memory Alloy. IX Międzynarodowe Warsztaty Doktoranckie OWD'2007, Wisła 20-23 października 2007, str. 177-180,

[2] Kciuk M.: Skomputeryzowane stanowisko do badania charakterystyk materiałów z pamięcią kształtu. VIII Krajowa Konferencja Elektroniki Darłówko 7-10 czerwca [3] specyfikacja techniczna aktuatorów SMA http://www.smartpol.pl/pdf/spec\_flex.pdf
(data pobrania pliku ze strony: 4.09.2009)
[4] Brian Selden, Ku-Jin Cho, Harry Assada: Segmented binary control of SMA actuator systems using the Peltier effect.
IEEE Proceedings 2004. International Conference on Robotics & Automation, New Orleans, LA
[5] Kyu-Jin Cho, H. Harry Asada: Architecture design of multiaxis cellular actuator array using Segmented Binary Control of Shape Memory Alloy. IEEE Transactions on robotics, 2006.

[6] Lael U. Odhner H. Harry Asada: Sensorless temperature estimation and control of Shape Memory Alloy actuators using thermoelectric devices. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics VOL. 11, NO. 2, April 2006.

[7] Klapyta G., Jędryczek T., Kluszczyński K.: Stopy z pamięcią kształtu (SMA) w mechatronice. Przegląd elektrotechniczny – nr 9, str 825-828, 2004.
[8] Kluszczyński K., Nadolski R., Klapyta G., Pudłowski Z.J.: Devices that employ shape memory alloys: laboratory stands and case studies in mechatronics education.
8th UICEE Annual Conference on Engeneering Education, str. 42-45 Kingston, Jamaica, 7-11 February, 2005.

"Praca finansowana z projektu badawczego nr 3530/B/T02/2009/36"



Autor mgr inż. Marek Kciuk Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Mechatroniki, Ul. Akademicka 10a 44-100 GLIWICE tel. (32) 237-28-03

marek.kciuk@polsl.pl