

Milena KURZAWA\*, Dorota STACHOWIAK\*

## ANALIZA STANÓW PRACY AKTUATORA WYKONANEGO ZE STOPU NI-TI PRACUJĄCEGO W UKŁADZIE SZEREGOWYM ZE SPRĘŻYNĄ STALOWĄ

W pracy przedstawiono algorytm i oprogramowanie do wyznaczania rozkładu sił w układzie składającym się z dwóch sprężyn: sprężyny wykonanej ze stopu Ni-Ti i sprężyny stalowej. Program umożliwia wstępne zaprojektowanie aktuatora sprężynowego wykonanego ze stopu z pamięcią kształtu (SMA) pracującego w układzie szeregowym ze sprężyną stalową. Obliczono rozkład sił w zaprojektowanym układzie dla stanu wysoko i niskotemperaturowego. Przedstawiono wybrane wyniki eksperymentalnego wyznaczania charakterystyk dynamicznych z uwzględnieniem zmian długości sprężyny SMA i temperatury w funkcji czasu przy liniowo narastającym obciążeniu i przy skokowym załączeniu i wyłączeniu prądu.

SŁOWA KLUCZOWE: stopy z pamięcią kształtu, sprężyna SMA, sprężyna stalowa, faza niskotemperaturowa, faza wysokotemperaturowa.

### 1. WPROWADZENIE

W nowoczesnych rozwiązaniach technicznych praktyczne zastosowanie znalazły stopy z pamięcią kształtu [1,5,6,8]. Ze względu na sposób aktywacji efektu pamięci kształtu wyróżnia się dwa rodzaje stopów z pamięcią kształtu: stopy z pamięcią kształtu aktywowane energią cieplną (Shape Memory Alloys - SMA) oraz magnetyczne stopy z pamięcią kształtu aktywowane polem magnetycznym (MSMA). Cechą charakterystyczną SMA jest zdolność do zmiany kształtu w wyniku termosprężystej przemiany martenzytycznej zachodzącej pod wpływem dostarczanego ciepła i/lub wywołanej przez naprężenia przyłożone z zewnątrz. Podczas przemiany powstają przesunięcia w krystalicznej strukturze materiału. Przesunięcia te są transformacją pomiędzy dwoma stałymi fazami SMA: fazą wysokotemperaturową (tzw. macierzystą lub fazą austenitu) i fazą niskotemperaturową (fazą martenzytu). Przejście między tymi stanami wskutek nagrzewania lub chłodzenia jest cechą determinującą właściwości SMA. Podczas przemiany fazowej występują cztery charakterystyczne temperatury przemian:  $M_s$  – temperatura początku tworzenia martenzytu (podczas chłodzenia

---

\* Politechnika Poznańska

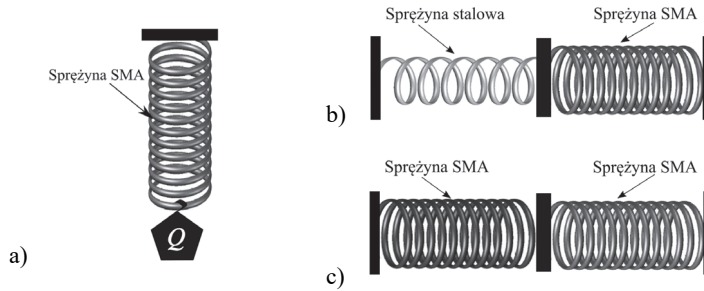
faza macierzysta przekształca się w martenzyt),  $M_f$  – temperatura końca przemiany w martenzyt,  $A_s$  – temperatura początku przemiany austenicznej (podczas ogrzewania martenzyt zmienia się w fazę macierzystą),  $A_f$  – temperatura końca przemiany martenzytu w fazę macierzystą. Z odwracalną przemianą martenzytyczną związany jest jedno i dwukierunkowy efekt pamięci kształtu oraz superelastyczność zwana także pseudosprężystością [2, 3, 4, 6].

Opracowano wiele stopów wykazujących efekt pamięci kształtu o bardzo różnych właściwościach [4,6]. Obecnie najlepiej opanowana jest technologia produkcji stopu niklu i tytanu (NiTi), który występuje pod handlową nazwą Nitinol [4, 6]. SMA znalazły szerokie zastosowanie w przemyśle, medycynie i lotnictwie. Właściwości stopów SMA dostosowane są do ich zastosowań. SMA stosuje się jako elementy aktywne układów wykonawczych a także jako elementy pomiarowe oraz w przypadkach, w których niemożliwe są rozwiązania tradycyjne [1, 5, 6, 8]. W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań laboratoryjnych zaprojektowanego układu sprężyn: sprężyny stalowej oraz sprężyny SMA nagrzewanej oporowo prądem.

## 2. ZASADA DZIAŁANIA AKTUATORA SKŁADAJĄCEGO SIĘ ZE SPRĘŻYNY SMA I STALOWEJ PRZECIWSPRĘŻYNY

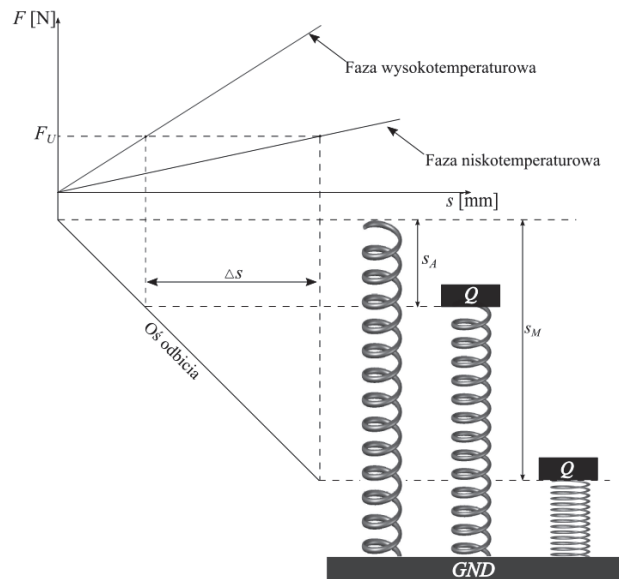
Praca aktuatorów wykonanych ze materiałów SMA bazuje na dużej zmianie modułów sprężystości postaciowej w wąskim przedziale temperatur przemiany. Moduł sprężystości postaciowej rośnie podczas przemiany odwrotnej martenzytu w fazę austeniczną. Ze wzrostem modułu sprężystości wzrasta współczynnik sztywności sprężyny, który jest proporcjonalny do modułu. Ze względu na różne właściwości mechaniczne SMA w fazie wysokotemperaturowej i niskotemperaturowej, można wykonywać pracę mechaniczną podczas przełączania między dwiema fazami.

W zastosowaniach inżynierskich najczęściej wykorzystuje się jednokierunkowy efekt pamięci kształtu. Jednokierunkowy efekt pamięci kształtu powstaje w temperaturach niższych od  $M_f$  a zmiana kształtu następuje pod wpływem działania siły zewnętrznej. Następnie po podgrzaniu SMA następuje odzysk kształtu. Siłowniki SMA zwykle złożone są z co najmniej jednego elementu uruchamiającego i co najmniej jednego elementu zwrotnego [4, 6]. Na rys. 1 przedstawiono podstawowe układy pracy siłowników SMA. W przypadku układu A (rys. 1a) sprężyna SMA w stanie niskotemperaturowym uzyskuje wydłużenie pod wpływem ciężaru masy  $Q$ . Ruch roboczy uzyskuje się przez podgrzanie sprężyny SMA. Na rys. 1b przedstawiono układ B, w którym ruch roboczy realizowany jest za pomocą sprężyny SMA a ruch powrotny za pomocą sprężyny stalowej. W przypadku układu C (rys. 1c) zarówno ruch roboczy jak i powrotny wykonywany jest przez sprężyny SMA, które naprzemiennie są podgrzewane.



Rys. 1. Podstawowe układy pracy siłowników SMA: a) układ A, b) układ B, c) układ C

Sprężyny ze względu na obciążenie mogą być ściskane lub rozciągane. W artykule rozpatrzono sprężynę SMA pracującą na ściskanie. W stanie martenzytycznym sprężyna posiada ściśle zwinięte zwoje a w czasie nagrzewania wydłuża się wykonując pracę. Na rys. 2. przedstawiono zasadę działania aktuatora SMA pracującego ze stałym obciążeniem (układ A – rys. 1a) oraz zależność siły  $F$  od odkształcenia  $s$  sprężyny dla fazy niskotemperaturowej i wysokotemperaturowej.

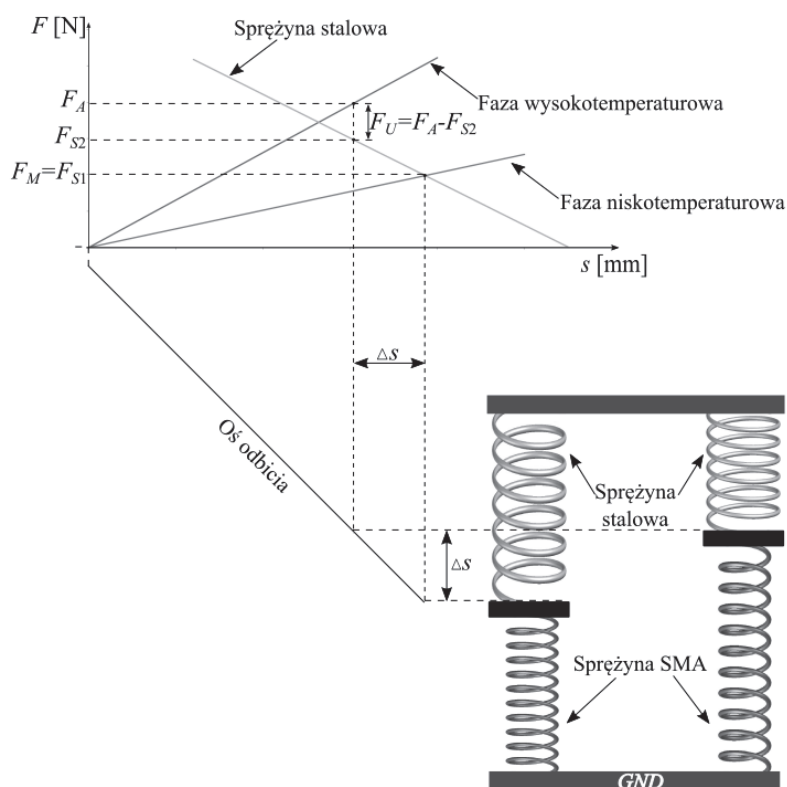


Rys. 2. Siła w funkcji odkształcenia sprężyny naciskowej dla fazy wysokotemperaturowej i niskotemperaturowej

W fazie niskotemperaturowej siłownik znajduje się w fazie "miękkiej". Po- przez element powrotny, w tym przypadku stałą masę, sprężyna SMA ulega

skróceniu o  $s_M$  – rys. 2. Zwiększając temperaturę, krystaliczna struktura materiału SMA przechodzi w "twardą" fazę wysokotemperaturową. Siłownik stara się osiągnąć swój nienaprzężony początkowy kształt i wytwarza siłę oporową. W fazie wysokotemperaturowej siła ta osiąga swoją maksymalną wartość a sprężyna ulega odkształceniu w stosunku do początkowego kształtu o  $s_A$ . Przesunięcie robocze  $\Delta s$  sprężyny to różnica między odkształceniami w fazie wysokiej i niskiej temperatury.

W przypadku układu sprężyny SMA i stalowej podczas nagrzewania sprężyna SMA pracuje przeciw wzrastającej sile sprężyny stalowej. Zasadę działania aktuatora SMA pracującego ze stalową sprężyną oporową zilustrowano na rys. 3.



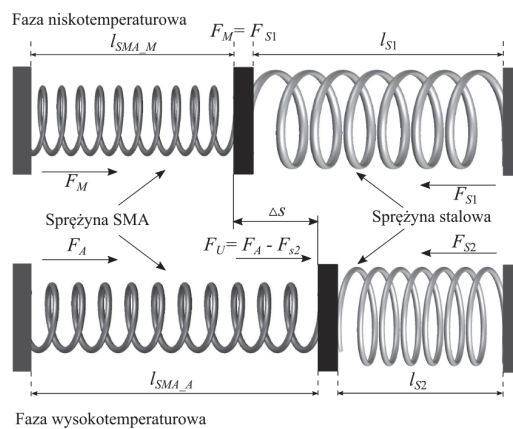
Rys. 3. Siła w funkcji odkształcenia dla układu sprężyny SMA i stalowej przeciwsprężyny

Sprężyna SMA generuje siłę  $F_A$  dla fazy wysokotemperaturowej i siłę  $F_M$  dla fazy niskotemperaturowej. Natomiast sprężyna stalowa generuje siłę  $F_S$  która jest niezależna od temperatury. Siła użyteczna (wypadkowa)  $F_U$  układu sprężyn jest różnicą sił  $F_A - F_{S2}$  podczas nagrzewania i różnicą sił  $F_{S1} - F_M$  podczas chł-

dzenia. Na rys. 3 przedstawiono zależność siły od odkształcenia sprężyny SMA dla obu faz oraz charakterystykę siły w funkcji odkształcenia sprężyny stalowej. Punkty przecięcia charakterystyki sprężyny stalowej z charakterystykami sprężyny SMA determinują końcowe pozycje aktuatora SMA. Przesunięcie robocze  $\Delta s$  kontrolowane jest odległością tych punktów.

### 3. ALGORYTM WYZNACZANIA SIŁ

Rozpatrzono układ składający się ze sprężyny SMA i sprężyny stalowej – rys. 4. Długość swobodna sprężyny SMA w stanie nieobciążonym wynosi  $l_{SMA}$  a sprężyny stalowej  $l_S$ . W stanie niskotemperaturowym układ sprężyn jest w stanie równowagi wówczas gdy siła wywierana przez sprężynę stalową  $F_{S1}$  jest równa sile sprężyny SMA –  $F_M$ . Długość sprężyny SMA w stanie martenzytycznym wynosi  $l_{SMA\_M}$  a sprężyny stalowej  $l_{S1}$  – rys. 4. Podczas nagrzewania sprężyny SMA długość w stanie wysokotemperaturowym sprężyny wynosi  $l_{SMA\_A}$ , natomiast sprężyny stalowej  $l_{S2}$  – rys. 4. Siła użyteczna  $F_U$  (różnica sił  $F_A - F_{S2}$ ) generowana przez układ sprężyn pozwala na wydłużenie sprężyny SMA w stanie wysokotemperaturowym oraz ściśnięcie sprężyny odporowej o przesunięcie robocze  $\Delta s$ .



Rys. 4. Schemat działania sił występujących w układzie

W celu wyznaczenia rozkładu sił w układzie sprężyny SMA i stalowej przeciwsprężyny należy wyznaczyć współczynniki sztywności sprężyny SMA dla fazy wysokotemperaturowej i niskotemperaturowej. W pierwszym kroku należy wyznaczyć moduł sprężystości poprzecznej  $G_A$  dla sprężyny SMA w fazie wysokotemperaturowej opisany następującą zależnością [4,7]:

$$G_A = \frac{E_A}{2(1+\nu)}, \quad (1)$$

w której  $E_A$  to moduł Younga w fazie wysokotemperaturowej,  $\nu$  to liczba Poissona.

W fazie martenzytycznej moduł Kirchhoffa przyjmuje postać:

$$G_M = \frac{E_M}{2(1+\nu)}, \quad (2)$$

w której  $E_M$  to moduł Younga w fazie niskotemperaturowej.

Przy założeniu liniowego odkształcenia sprężyny SMA, odkształcenie ścinające  $\gamma_A$  jest funkcją naprężenia ścinającego  $\tau_A$  i modułu Kirchhoffa  $G_A$  w fazie wysokotemperaturowej [4,7]:

$$\gamma_A = \frac{\tau_A}{G_A}. \quad (3)$$

Odkształcenie ścinające  $\gamma_M$  w fazie niskotemperaturowej opisane jest zależnością

$$\gamma_M = \frac{\tau_M}{G_M}. \quad (4)$$

Liczbę zwojów czynnych  $n$  sprężyny SMA oszacować można na podstawie zależności:

$$n = \frac{\Delta s d}{\pi D^2 \Delta \gamma}, \quad (5)$$

w której  $\Delta s$  to wartość przemieszczenia sprężyny,  $d$  to średnica drutu sprężyny SMA,  $D$  to średnica sprężyny,  $\Delta \gamma$  to różnica odkształcenia ścinającego między fazą niskotemperaturową  $\gamma_M$  a fazą wysokotemperaturową  $\gamma_A$ , ( $\Delta \gamma = \gamma_M - \gamma_A$ ).

W kolejnym etapie należy wyznaczyć współczynniki sztywności sprężyny SMA dla obydwu faz temperaturowych. Wysokotemperaturowy współczynnik sztywności sprężyny opisany jest zależnością:

$$C_A = \frac{G_A d^4}{8nD^3}, \quad (6)$$

Niskotemperaturowy współczynnik sztywności sprężyny przyjmuje postać:

$$C_M = \frac{G_M d^4}{8nD^3}. \quad (7)$$

Siły sprężyny SMA  $F_M$  i stalowej sprężyny oporowej  $F_{S1}$  w stanie niskotemperaturowym wyznaczyć można z zależności [4]:

$$F_M = s_M C_M, \quad (8)$$

$$F_{S1} = s_{S1} C_s, \quad (9)$$

w których  $s_M$  jest odkształceniem (ugięciem) sprężyny SMA a  $s_{S1}$  jest odkształceniem (ugięciem) sprężyny stalowej w fazie martenzytycznej.

Natomiast w stanie wysokotemperaturowym siły sprężyny SMA  $F_A$  i stalowej sprężyny oporowej  $F_{S2}$  przyjmują postać [4]:

$$F_A = s_A C_A, \quad (10)$$

$$F_{S2} = s_{S2} C_s, \quad (11)$$

w których  $s_A$  jest odkształceniem (ugięciem) sprężyny SMA a  $s_{S2}$  jest odkształceniem (ugięciem) sprężyny stalowej w fazie austenicznej.

Siła użyteczna (wypadkowa) potrzebna do przemieszczenia sprężyny SMA w stanie wysokotemperaturowym oraz ściśnięcia sprężyny oporowej to różnica sił:

$$F_U = F_A - F_{S2}. \quad (12)$$

Na podstawie przedstawionego algorytmu opracowano oprogramowanie własne służące do wyznaczania sił w układzie sprężyny SMA i stalowej przeciw-sprężyny. Aplikację opracowano w środowisku *Microsoft Visual Studio C#* która umożliwia:

- wprowadzenie danych (np. z pliku) opisujących parametry sprężyn potrzebnych do obliczenia sił działających w układzie – rys. 5;
- wyznaczenie wartości sił poszczególnych sprężyn dla stanu wysoko i niskotemperaturowego oraz siły wypadkowej niezbędnej do zadziałania układu – rys. 6;
- wykreślenie charakterystyk sił w funkcji odkształcenia i wyznaczenie obszaru roboczego – rys. 6.

Parametry		
	Sprężyna SMA	Sprężyna stalowa
średnica drutu [mm]	1	0.8
średnica sprężyny [mm]	10	15
długość swobodna [mm]	57	46
całkowita liczba zwojów	11	7

Odształcenia (ugięcia)		
	Sprężyna SMA	Sprężyna stalowa
Faza niskotemperaturowa	38.6	16.5
Faza wysokotemperaturowa	30.6	24.5

Oblicz współczynnik sztywności

na podstawie pomiarów

Faza niskotemperaturowa sprężyny SMA,  
Faza wysokotemperaturowa sprężyny SMA,  
Wyniki dla sprężyny stalowej

na podstawie właściwości materiałowych

Faza niskotemperaturowa sprężyny SMA,  
Faza wysokotemperaturowa sprężyny SMA,  
Wyniki dla sprężyny stalowej

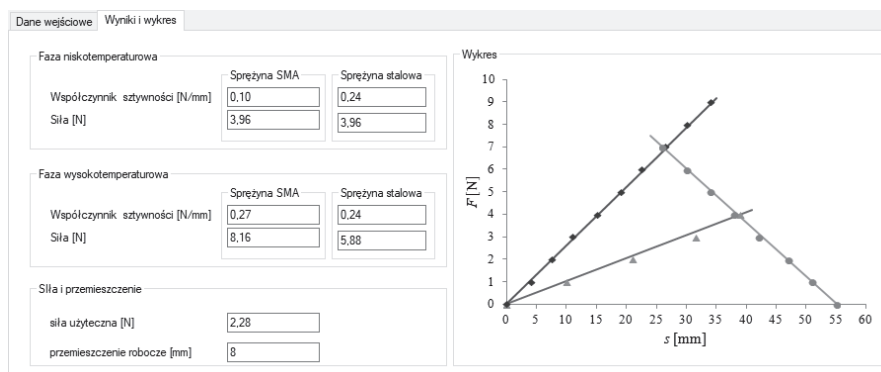
Oblicz i wykreśl wykres

Rys. 5. Program doboru sił w układzie szeregowym sprężyny stalowej oraz sprężyny SMA – wprowadzenie danych

#### 4. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

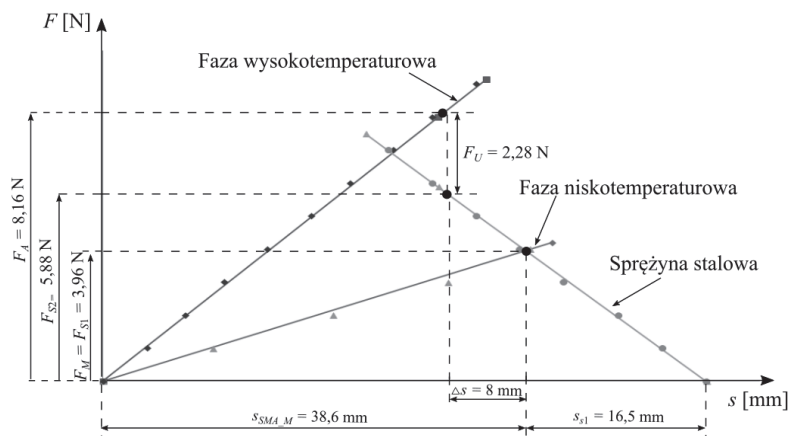
W pracy zbadano aktuator SMA zaprojektowany i wykonany na podstawie autorskiego oprogramowanie do projektowania aktuatora sprężynowego SMA [7].

Rozpatrzono sprężyny o parametrach przedstawionych na rys. 5. Na podstawie przedstawionego powyżej algorytmu wyznaczono rozkład sił w układzie. Porównanie zmierzonych i wyznaczonych sił zilustrowano na rys. 7.



Rys. 6. Program doboru sił w układzie szeregowym sprężyny stalowej oraz sprężyny SMA - charakterystyki sił w funkcji odkształcenia

Linie proste oznaczone jako: SMA (faza wysokotemperaturowa), SMA (faza niskotemperaturowa) oraz sprężyna stalowa świadczą o podatności sprężyn na odkształcenia. Znając obszar roboczy działania sprężyny SMA można prawidłowo dobrać sprężynę stalową.

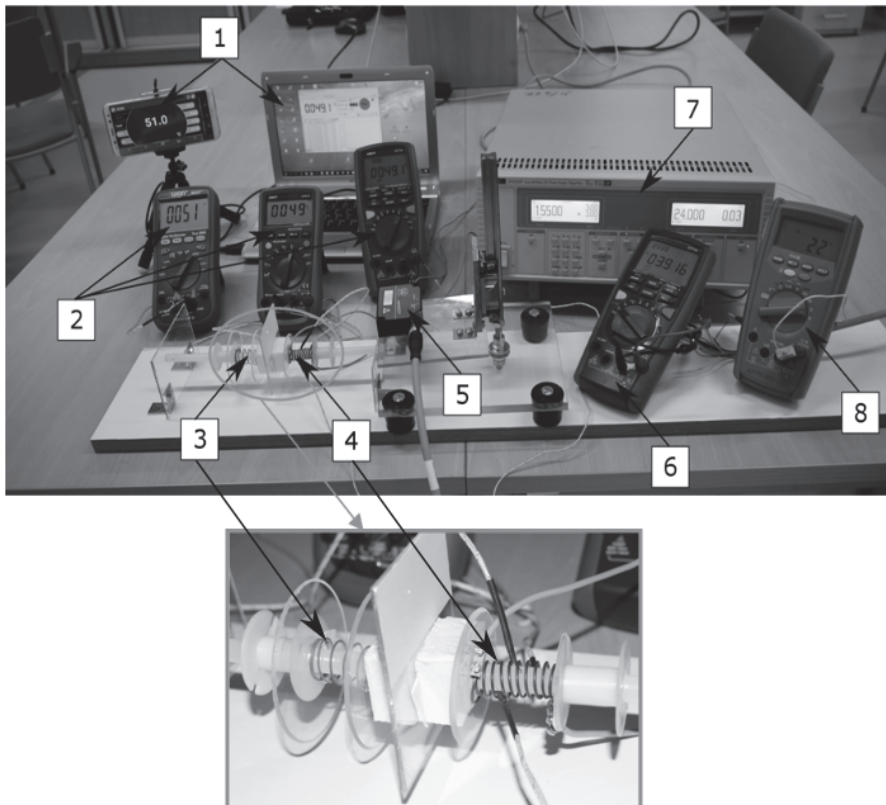


Rys.7. Obliczone i zmierzone siły w funkcji odkształcenia dla układu sprężyny SMA i stalowej przeciwsprężyny

Do badań aktuatora SMA pracującego w układzie szeregowym ze sprężyną stalową zostało zaprojektowane i wykonane stanowisko laboratoryjne – rys. 8.



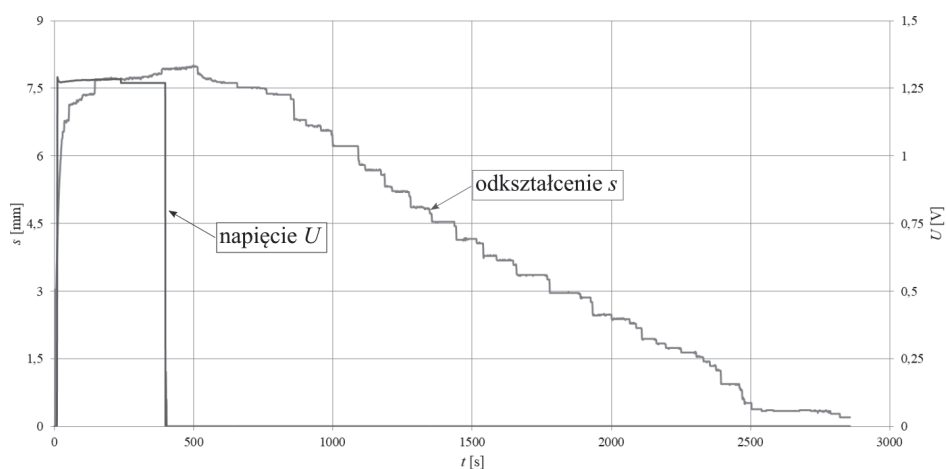
Umożliwia ono pomiar, archiwizację i wizualizację przebiegów prądu, napięcia, temperatur oraz przemieszczenia sprężyny SMA. Stanowisko pomiarowe (rys. 8) składa się m.in. z zestawu komputerowego do monitorowania i rejestracji wartości mierzonych (1), mierników umożliwiających pomiar temperatury sprężyny SMA za pomocą trzech termopar typu K (2), sprężyny stalowej (3), sprężyny SMA (4), czujnika laserowego z serii optoNCDT realizującego bezkontaktowy pomiar przemieszczenia w oparciu o zasadę triangulacji optycznej (5), miernika rejestrującego wartość przemieszczenia wskazywaną przez czujnik laserowy (6) zasilacza QPX600DP (80 V, 50 A) umożliwiającego stabilizację wartości prądu ( $I$ ) oraz napięcia ( $U$ ) (7) oraz miernika służącego do pomiaru temperatury otoczenia (8).



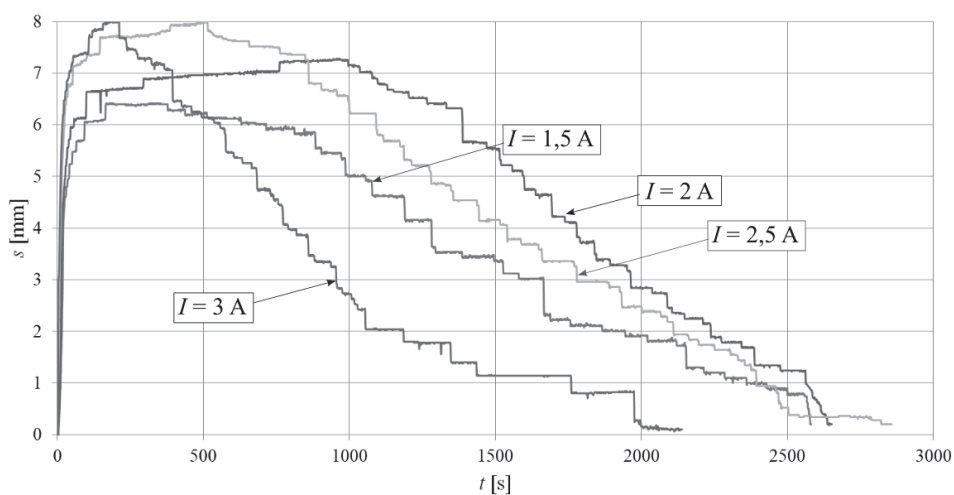
Rys. 8. Widok stanowiska pomiarowego (wyjaśnienie oznaczeń w tekście)

Stanowisko pomiarowe zbudowano z myślą o prowadzeniu badań eksperymentalnych układu sprężyn w stanach statycznych oraz rejestrację procesów zachodzących w stanach dynamicznych. Wybrane charakterystyki dynamiczne

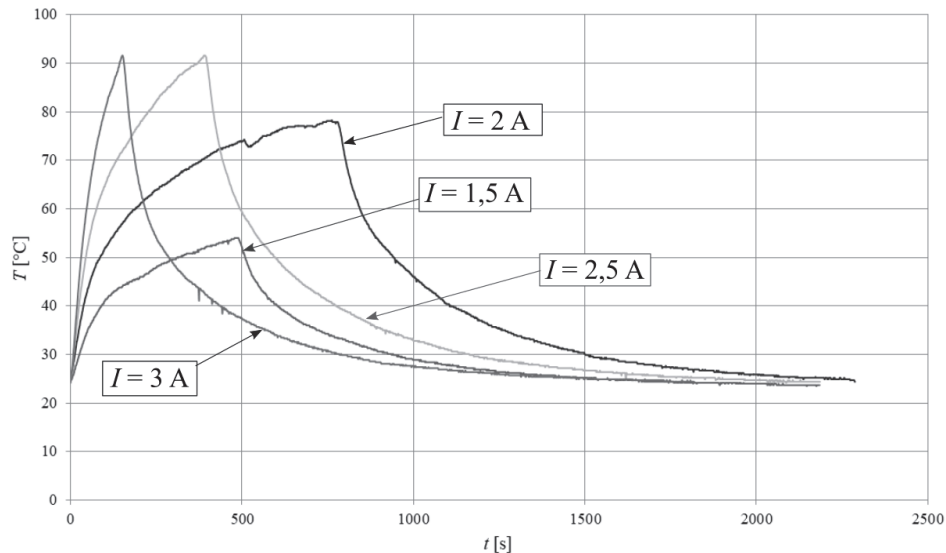
wyznaczone na stanowisku przedstawiono na rysunkach 9, 10 i 11. Podczas badań rejestrowano w czasie rzeczywistym natężenie prądu płynącego przez sprężynę SMA, spadek napięcia na sprężynie, przemieszczenie aktuatora SMA, temperaturę otoczenia oraz temperaturę sprężyny w trzech punktach. W celu sprawdzenia powtarzalności wyników wykonano kilka serii pomiarowych dla tych samych warunków wymuszenia i obciążenia. Czas grzania i chłodzenia dobrano w taki sposób żeby osiągnąć stan ustalony.



Rys. 9. Przebieg napięcia i przemieszczenia w czasie dla prądu  $I = 2,5$  A



Rys. 10. Przebieg przemieszczenia w czasie dla różnych wartości prądu



Rys. 11. Przebieg temperatury w czasie dla różnych wartości prądu

Analizując otrzymane przebiegi zauważyć można niesymetryczność procesu grzania i chłodzenia. Stała czasowa procesu grzania sprężyny SMA jest krótsza od procesu chłodzenia. Związane jest to z brakiem kontroli nad procesem chłodzenia. W celu poprawy dynamiki układu należałoby zaprojektować układ chłodzenia. Aktuatory SMA ze względu na nieliniowe i histerezowe [2,3] charakterystyki nie są łatwym obiektem do sterowania. Z uwagi na nieliniowe własności aktuatora SMA jego reakcja na sygnał prądowy jest trudna do przewidzenia.

## 5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono strategię projektowania układu składającego się z dwóch sprężyn: sprężyny wykonanej ze stopu Ni-Ti i sprężyny stalowej. Opracowane oprogramowanie do wyznaczania rozkładu sił w tym układzie można zastosować w procesie projektowania aktuatora SMA przeznaczonego do różnych zastosowań. Aktuatory SMA mogą być stosowane jako elektryczne lub jako termiczne. Zaletą zaprojektowanego układu jest możliwość pracy przy braku zasilania np. w stanach zagrożenia pożarowego może pełnić funkcję czujnika temperatury i jednocześnie wykonywać pracę uruchamiającą system awaryjny.

## LITERATURA

- [1] Enyu J., Xiaojin Z., Yong S., Zhengliang W., Active Vibration Control of Smart Structure Based on Alternate Driving SMA Actuators, *App. Mech. and Materials* 39 (2011) pp. 61-66, 2011.
- [2] Kluszczynski K., Kciuk M., SMA actuators: theory, performance curves and design problems, *Compel*, vol. 32, no. 4, pp. 1417–1427, 2013.
- [3] Kurzawa M., Stachowiak D, Investigation on thermo-mechanical behavior in shape memory alloy actuator. *Archives of Electrical Engineering*, vol. 66, no. 4, pp. 751-760, 2017.
- [4] Lagoudas D. C., *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*, Springer, 2008.
- [5] Mohd Jani J., Leary M., Subic A., Gibson M. A., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Materials and Design*, vol. 56, s. 1078–1113, 2014.
- [6] Morawiec H., *Metale z pamięcią kształtu i ich zastosowanie*, Prace Naukowe, Uniwersytet Śląski, 2014.
- [7] Stachowiak D., Kurzawa M., Charchuta I., Oprogramowanie do projektowania aktuatorów liniowych wykonanych ze stopów z pamięcią kształtu, *Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, Issue 91, pp. 355-364, 2017.
- [8] Yoo, S, Yeo, J, Hwang, S. Application of a NiTi alloy two-way shape memory helical coil for a versatile insulating jacket, *Materials Science and Engineering A*, pp. 662–667, 2008.

### **ANALYSIS OF OPERATING MODES OF SPRING ACTUATOR MADE OF NI-TI ALLOY WORKING IN A SERIES WITH A STEEL SPRING**

In the paper the algorithm and the computer software for determining the distribution of forces in a system consisting of two springs are presented. A system consisting of a spring made of Ni-Ti alloy and a steel spring has been considered. The main task of this software is designing of a spring actuator made of a shape memory alloy (SMA) operating in a series with a steel spring. The distribution of forces in the designed system for high and low temperature condition has been calculated. Selected results of laboratory tests of the designed spring system have been given. The dynamic characteristics have been presented, taking into account changes in the length of the SMA spring and temperature as a function of time with a linearly increasing load and at stepping on and off the current.

*(Received: 21.02.2018, revised: 15.03.2018)*