

Dorota STACHOWIAK\*

## WPLYW NAMAGNESOWANIA WSTEPNEGO RDZENIA WYKONANEGO Z TERFENOLU-D NA PRACE MAGNETOSTRYKCYJNEGO AKTUATORA

W pracy krótko omówiono budowę i zasadę działania magnetostrykcyjnego aktuatora z rdzeniem wykonanym z Terfenolu-D. Przedstawiono typowe właściwości charakteryzujące materiały o gigantycznej magnetostrykcji. Analizowano wpływ namagnesowania wstępnego rdzenia z Terfenolu-D na pracę magnetostrykcyjnego aktuatora. Szczególną uwagę zwrócono na rozkład natężenia pola magnetycznego w rdzeniu o gigantycznej magnetostrykcji. Do wyznaczania rozkładu pola wykorzystano metodę elementów skończonych. Dla wybranej konstrukcji magnetostrykcyjnego aktuatora wyznaczono wydłużenie rdzenia dla różnych wartości prądu zasilającego.

### 1. WSTĘP

Zjawisko magnetostrykcji polega na zmianie wymiarów (odkształceniu) materiału przy zmianie wartości i kierunku magnesowania. Zjawisko magnetostrykcji występuje we wszystkich ferromagnetykach, ferrimagnetykach oraz antyferromagnetykach. Ze względu na wielkość magnetostrykcji tylko materiały ferromagnetyczne znalazły zastosowanie praktyczne.

Wraz z rozwojem technologii opracowywane są materiały o gigantycznej magnetostrykcji – GMM (ang.: Giant Magnetostrictive Materials). Materiały GMM charakteryzują się o kilka rzędów większą magnetostrykcją od niklu – efekt tzw. gigantycznej magnetostrykcji. Do częściej stosowanych materiałów GMM należy grupa materiałów o nazwie Terfenol-D. Materiał ten ( $Tb_xDy_{1-x}Fe_{1,9-2}$ ,  $x \sim 0,3$ ) jest międzymetalicznym stopem pierwiastków ziem rzadkich, terbu i dysprozu, oraz żelaza opracowanym w Naval Ordnance Laboratory [2, 4, 5].

Stopy  $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$  znalazły zastosowanie jako człony wykonawcze we wzbudnikach magnetostrykcyjnych, których jakość zależy od właściwości materiału magnetostrykcyjnego. W zależności od składu chemicznego i sposobu wytwarzania stopy  $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$  różnią się swoimi właściwościami fizycznymi. W tabeli 1 przedstawiono typowe właściwości charakteryzujące Terfenol-D [2, 3, 4].

---

\* Politechnika Poznańska.

Tabela 1. Wybrane właściwości materiału o gigantycznej magnetostrykcji

Magnetostrykcja ( $\times 10^{-6}$ )	1000-2400 przy 50-200 [kA/m]
Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	28
Wytrzymałość na ściskanie (MPa)	(260 ÷ 700)
moduł Younga (GPa)	25 – 35
Rezystywność właściwa [ $\Omega\text{m}$ ]	$58 \cdot 10^{-8}$
Przenikalność magnetyczna względna	3 ÷ 15
Dokładność przemieszczenia	$(10^{-1} \div 10^{-3}) \mu\text{m}$

Magnetostrykcyjne aktuatory, wykorzystujące materiały typu GMM, charakteryzują się dużą siłą, odkształceniem i precyzyjnym przemieszczeniem przy niewielkich rozmiarach i krótkim czasie reakcji. Pozwala to na zastosowanie ich w super precyzyjnych narzędziach mechanicznych, w przyrządach do aktywnego tłumienia drgań, w super szybkich zaworach, w pompach wtryskowych do samochodów, w myjkach ultradźwiękowych, w aparaturze akustycznej i wielu innych [2, 4, 5].

W pracy analizowano magnetostrykcyjny aktuator (aktuator GMA) z rdzeniem wykonanym z materiału o gigantycznej magnetostrykcji –Terfenolu-D.

## 2. RÓWNANIA MAGNETOMECHANICZNE

W materiałach magnetostrykcyjnych występują zjawiska krzyżowe o charakterze magnetomechanicznym. Do najczęściej wykorzystywanych zjawisk należy zjawisko Joula i Villariego. Zjawiskiem Joula nazywa się efekt prosty magnetostrykcji lub magnetostrykcję liniową, polegającą na zmianie długości próbki pod wpływem magnesowania przy odpowiedniej zmianie przekroju poprzecznego. Zachowana zostaje stała objętość. Magnetostrykcja liniowa wykorzystywana jest m.in. w magnetostrykcyjnych aktuatorach i wzbudnikach drgań.

Magnetostrykcja liniowa określana jest jako podłużna lub wzdłużna, gdy kierunek mierzonych odkształceń względnych jest zgodny z przyłożonym polem magnetycznym. Współczynnik magnetostrykcji można opisać następująco,

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

gdzie  $l$  – początkowa długość próbki,  $\Delta l$  – przyrost długości (odkształcenie magnetostrykcyjne).

Zjawiskiem odwrotnym do efektu Joula jest zjawisko Villariego i polega na zmianie magnetyzacji pod wpływem przyłożonych do próbki sił mechanicznych wprowadzających naprężenia sprężyste. Zmiany te zależą od znaku i kierunku przyłożonych sił. Odwrotne zjawisko magnetostrykcji wykorzystywane jest głównie w urządzeniach służących do pomiaru sił, momentu oraz czujnikach drgań.

W materiałach magnetostrykcyjnych sprzężenie magnetomechaniczne, przy założeniu sprężystych odkształceń i odwracalnej magnetyzacji, można wyrazić w postaci układu równań, w którym odkształcenie  $\varepsilon$  i indukcja magnetyczna  $B$  są funkcjami naprężenia  $\sigma$  i natężenia pola magnetycznego  $H$ ;  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma, H)$ ,  $B = B(\sigma, H)$ . Dla przypadku jednoosiowego i odpowiednio małych zmian  $\sigma$  oraz  $H$  można zapisać układ liniowych równań konstytutywnych w następującej postaci [2],

$$\varepsilon = s^H \sigma + d^\sigma H \quad (2)$$

$$B = d\sigma + \mu^\sigma H \quad (3)$$

w której  $s^H = \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right|_{H=\text{const}} = \frac{1}{E^H}$  oznacza podatność sprężystą przy stałym  $H$ , przy

czym  $E^H$  jest modułem Younga przy stałym natężeniu pola magnetycznego,

$d^\sigma = \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial H} \right|_{\sigma=\text{const}}$  jest stałą magnetostrykcyjną przy stałym naprężeniu,

$d = \left. \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right|_{H=\text{const}}$  jest parametrem efektu magnetomechanicznego, jeśli proces magnetostrykcji jest odpowiednio odwracalny wówczas  $d_\sigma = d$ ,

$\mu^\sigma = \left. \frac{\partial B}{\partial H} \right|_{\sigma=\text{const}}$  jest przenikalnością magnetyczną przy stałym naprężeniu.

Efektywność przemiany energii magnetycznej w energię mechaniczną można określić poprzez współczynnik sprzężenia magnetomechanicznego  $k$ ,

$$k = \frac{d}{\sqrt{\varepsilon^H \mu^\sigma}} \quad (4)$$

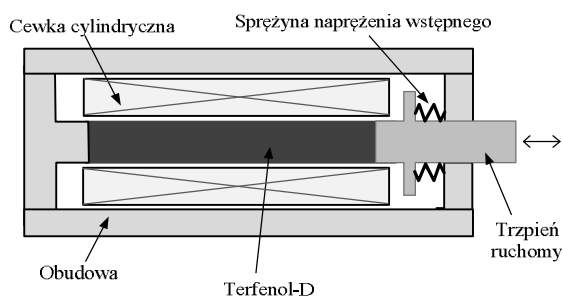
Wartość współczynnika  $k$  zwykle zawiera się w przedziale od 0,7 do 0,9 [2, 4].

### 3. MAGNETOSTRYKCYJNY AKTUATOR

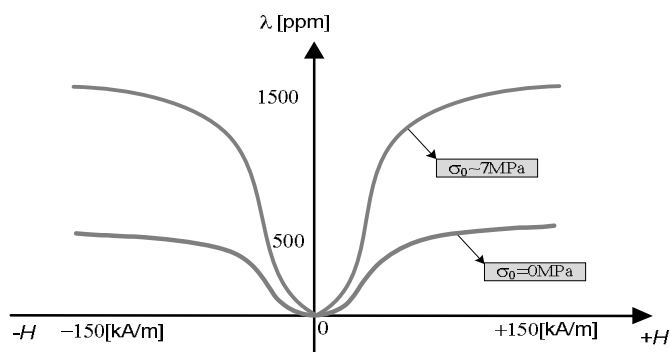
Na rysunku 1 przedstawiono schemat budowy typowego magnetostrykcyjnego aktuatora. Terfenol-D w postaci pręta otoczony jest cylindryczną cewką wytwarzającą pole magnetyczne. Sprężyny ściskające generują w pręcie naprężenie wstępne  $\sigma_0$ . Wprowadzenie naprężenia wstępnego pozwala na dobranie optymalnej pod względem liniowości charakterystyki magnetostrykcyjnej oraz możliwość uzyskania większych maksymalnych wartości odkształcenia - rys. 2 [4].

Magnetostrykcja jest zjawiskiem parzystym tzn., że zmianie znaku polaryzacji magnetycznej (natężenia pola lub indukcji) nie towarzyszy zmiana znaku magnetostrykcji. Na rysunku 3 pokazano wpływ namagnesowania wstępnego  $H_0$  na charakterystykę magnetostrykcyjną [6]. Przy braku namagnesowania wstępnego,

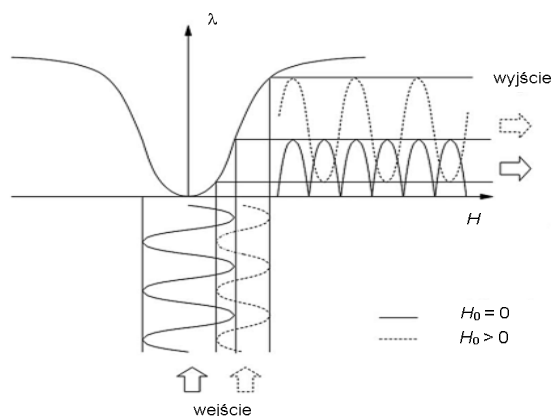
sinusoidalny prąd zasilający generuje odkształcenie magnetostrykcyjne o podwójnej częstotliwości w stosunku do zasilania (rys. 3). Wprowadzenie namagnesowania wstępnego zmniejsza zapotrzebowanie na moc potrzebną do wytworzenia zadanej wartości odkształcenia a także przesuwa roboczy obszar aktuatora GMA z zakresu nieliniowego do liniowego – patrz rys. 3.



Rys. 1. Schemat aktuatora GMA

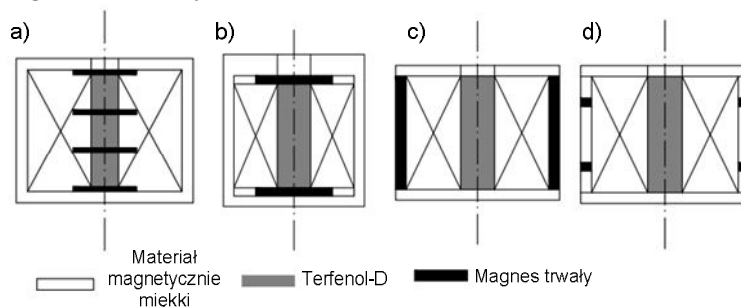


Rys. 2. Wpływ naprężenia wstępnego na kształt krzywych magnetostrykcyjnych Terfenolu-D [4]



Rys. 3. Wpływ namagnesowania wstępnego  $H_0$  na charakterystykę magnetostrykcyjną [6]

Do namagnesowania wstępnego materiału GMM wykorzystuje się dodatkowe uzwojenie zasilane prądem stałym lub magnesy trwałe [1,2]. Na rysunku 4 pokazano zazwyczaj stosowane konstrukcje obwodów magnetycznych aktuatorów GMA z magnesami trwałymi.

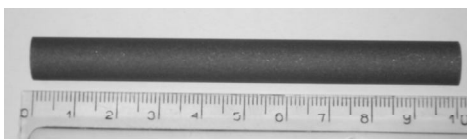


Rys. 4. Przykłady obwodów magnetycznych aktuatorów GMA z magnesami trwałymi [2]

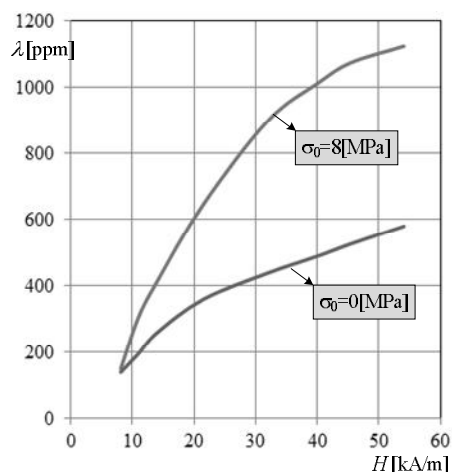
Poprzez zastosowanie odpowiedniego naprężenia i namagnesowania wstępnego można otrzymać wyższą sprawność i większe odkształcenie rdzenia wykonanego z materiału GMM [1, 2, 4].

#### 4. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

Rozpatrzono magnetostrykcyjny aktuator z rdzeniem wykonanym z Terfenolu-D w postaci pręta o wymiarach  $\phi 10 \times 100$  mm - rys. 5. Na rysunku 6 przedstawiono pomierzone charakterystyki magnetostrykcyjne dla pręta z Terfenolu-D przy stałym naprężeniu wstępnym [3].



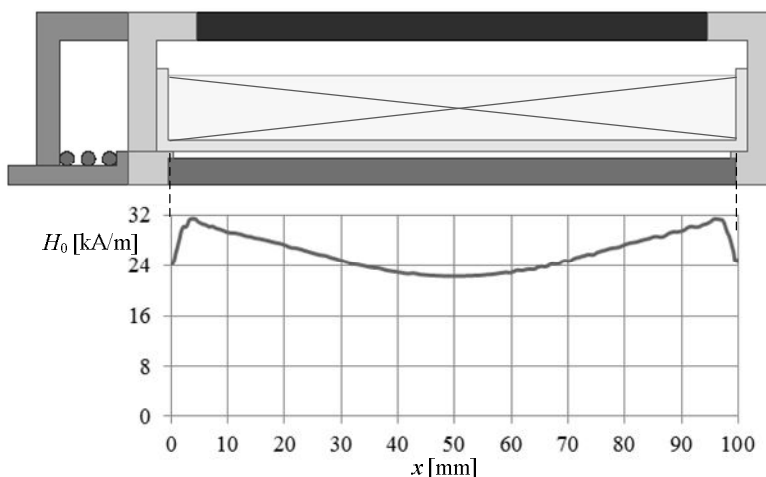
Rys. 5. Terfenol-D w postaci pręta



Rys. 6. Wpływ naprężenia wstępnego na charakterystykę magnetostrykcyjną Terfenolu-D

Model obliczeniowy aktuatora GMA wykonano wykorzystując metodę elementów skończonych i symetrię osiową konstrukcji. W obliczeniach pominięto prądy wirowe i zjawisko histerezy magnetycznej. W analizie pola uwzględniono nieliniową charakterystykę magnesowania Terfenolu-D i blachy prądnicowej EP20 oraz liniową charakterystykę od magnesowania magnesów trwałych ( $\text{SmCo}_{18}$ ). W obliczeniach wykorzystano charakterystykę magnesowania Terfenolu-D otrzymaną przy naprężeniu wstępnym  $\sigma_0 = 8\text{Mpa}$  [3]. W rozważaniach przyjęto, że optymalne natężenie pola namagnesowania wstępnego wynosi  $H_0 = 24$  [kA/m].

W pracy analizowano aktuator GMA z magnesami trwałymi umieszczonymi jak na rys. 4c. Na rys. 7 przedstawiono rozkład natężenia pola magnetycznego  $H_0$  w rdzeniu z Terfenolu-D dla aktuatora z magnesem trwałym o wymiarach  $\phi 61 \times \phi 51 \times 90\text{mm}$  (aktuator PM1) przy zerowym prądzie zasilającym ( $I=0$  [A]). Wartość natężenia  $H_0$  dla obydwu końców pręta z Terfenolu-D jest większa o około 25% w stosunku do wartości  $H_0$  dla środkowej części rdzenia.

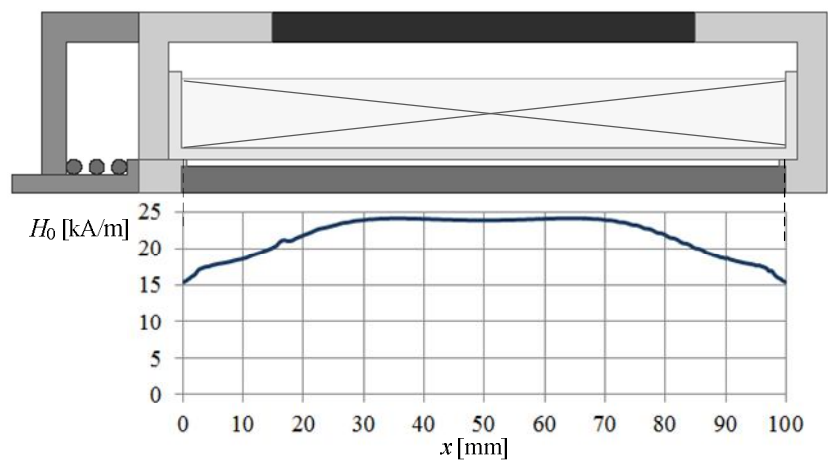


Rys. 7. Rozkład natężenia pola magnetycznego  $H_0$  w rdzeniu z Terfenolu-D (aktuator PM1,  $I=0$  [A])

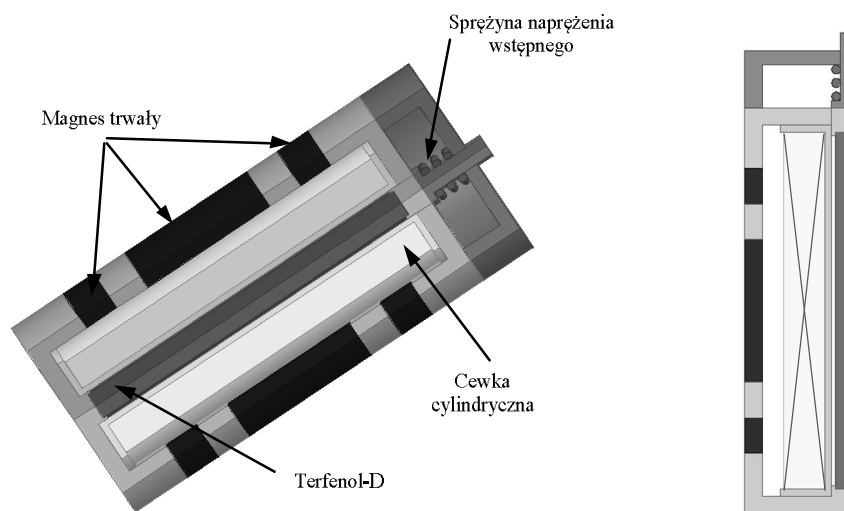
Natomiast na rys. 8 dla aktuatora z magnesem trwałym o wymiarach  $\phi 61 \times \phi 51 \times 70\text{mm}$  (aktuator PM2,  $I=0$  [A]). Wartość natężenia  $H_0$  dla obydwu końców pręta z Terfenolu-D jest mniejsza o około 35% w stosunku do wartości  $H_0$  dla środkowej części rdzenia.

W celu uzyskania jednorodnego rozkładu natężenia pola magnetycznego w materiale GMM dodano dwa dodatkowe pierścienie magnesów trwałych (aktuator PM3) – rys. 9.

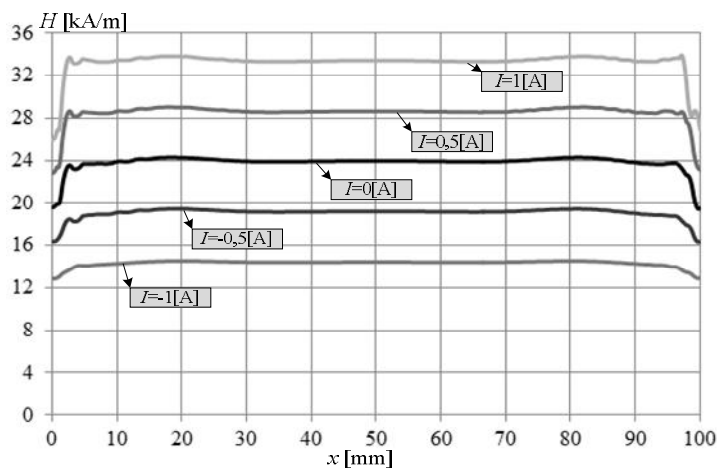
Na rys. 10 przedstawiono rozkład natężenia pola magnetycznego  $H$  w rdzeniu typu Terfenol-D dla aktuatora PM3.



Rys. 8. Rozkład natężenia pola magnetycznego  $H_0$  w rdzeniu z Terfenolu-D (aktuator PM2,  $I=0$  [A])



Rys. 9. Model aktuatora PM3



Rys. 10. Rozkład natężenia pola magnetycznego  $H$  w rdzeniu typu Terfenol-D (aktuator PM3)

Odształcenie magnetostrykcyjne zależy głównie od rozkładu pola magnetycznego w materiale GMM. Wydłużenie  $\Delta l$  można wyznaczyć na podstawie otrzymanych wartości natężenia pola magnetycznego, charakterystyki magnetostrykcyjnej ( $\lambda-H$ ), i stałej magnetostrykcyjnej  $d$ . W tabeli 2 zestawiono obliczone wartości odształcenia  $\Delta l$  przy zasilaniu prądem w przedziale od -1 [A] do 1 [A]. Jako pozycję zerową przyjęto odształcenie rdzenia przy namagnesowaniu wstępnym  $H_0 = 24$  [kA/m].

Tabela 2. Obliczone odształcenie magnetostrykcyjne  $\Delta l$  materiału GMM

$I$ [A]	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ]	-23,5	-19,7	-15,0	-10,0	-5,0	5,0	10,1	15,3	21,4	28,5

Wydłużenie maksymalne  $\Delta l$  zaprojektowanego aktuatora z rdzeniem typu Terfenol-D przy zasilaniu prądem w przedziale od -1 [A] do 1 [A] wynosi  $\Delta l = 52$  [ $\mu\text{m}$ ] i zawiera się w liniowym obszarze pracy.

## 5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono połowy model magnetostrykcyjnego aktuatora z rdzeniem wykonanym z Terfenolu-D. Zbadano wpływ namagnesowania wstępnego rdzenia wykonanego z materiału o gigantycznej magnetostrykcji na pracę aktuatora



GMA. Przy projektowaniu aktuatora GMA należy uwzględnić relację pomiędzy prądem zasilającym a rozkładem natężenia pola magnetycznego w rdzeniu GMM. W celu uzyskania jednorodnego pola magnetycznego w materiale GMM szczególnie ważny jest odpowiedni dobór magnesów trwałych odpowiedzialnych za namagnesowanie wstępne Terfenolu-D.

### LITERATURA

- [1] Engdahl G., Design procedure for optimal use of giant magnetostrictive materials in magnetostrictive actuator applications. International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 2002, pp. 554-557.
- [2] Engdahl G., Handbook of giant magnetostrictive materials. *San Diego*, USA: Academic Press; 2000.
- [3] Metall Rare Earth Limited, [www.metall.com.cn/tbdyfe2.htm](http://www.metall.com.cn/tbdyfe2.htm), accessed 30.01.2012r.
- [4] Olabi A. G., Grunwald A., Design and application of magnetostrictive materials, *Materials and Design* 28, 2008, pp. 469–483.
- [5] Yanan M., Li F., Application and development research on giant magnetostrictive apparatus. International Conference on Mechanical and Electronics Engineering, Kyoto, 2010, pp. 442-445.
- [6] Zhou N., Blatchley Ch. C., Ibeh Ch. C., Design and construction of a novel rotary magnetostrictive motor, *Journal of Applied Physics*, Volume 105, Issue 7, 2009, pp. 105-107.

### THE INFLUENCE OF MAGNETIC BIAS OF TERFENOL-D CORE ON OPERATION OF MAGNETOSTRICTIVE ACTUATOR

In the paper, the construction and principle of working of the magnetostrictive actuator with Terfenol-D core have been shortly presented. Typical giant magnetostrictive materials properties have been shown. The influence of magnetic bias of Terfenol-d core on operation of magnetostrictive actuator has been analyzed. A special attention is paid to the magnetic field intensity distribution in the Terfenol-D core. Finite element method for magnetic field analysis has been applied. Special construction of magnetostrictive actuator has been selected and extension of Terfenol-D core for different values of supply current has been calculated.