

dr inż. Roman Szewczyk
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów „PIAP”

prof. nzw. dr hab. inż. Adam Bieńkowski
Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej

MAGNETOSPĘŻYSTE SENSORY SIŁY Z PIERŚCIENIOWYMI RDZENIAMI O STRUKTURZE AMORFICZNEJ

W referacie przedstawiono konstrukcję oraz wyniki badań charakterystyk użytkowych magnetospężystych sensorów naprężeń i sił z pierścieniowymi rdzeniami z magnetyków o strukturze amorficznej. Opisano nowe rozwiązanie sensora, umożliwiające uzyskanie jednorodnego rozkładu naprężeń ściskających w rdzeniu pierścieniowym. Uzyskane parametry funkcjonalne sensorów wykazały możliwość ich zastosowania w zakresie automatyki przemysłowej.

MAGNETOELASTIC STRESS AND FORCE SENSORS WITH RING-SHAPED AMORPHOUS CORES

Paper presents construction and results of tests of the functional characteristics of the magnetoelastic force sensors with ring-shaped cores. In presented solution new method of applying the uniform compressive stress to the sensing element was used. Achieved functional parameters indicated possibility of application of such sensor in the field of industrial automation.

1. WSTĘP

W sensorach magnetospężystych, które wykorzystują magnetospężyste zjawisko Villarięgo, przyłożona siła wywołuje naprężenia w rdzeniu ferromagnetycznym, a w rezultacie wpływa na jego parametry magnetyczne, w tym na amplitudową przenikalność magnetyczną μ_a . Z tego względu przetworniki magnetospężyste nie wymagają stosowania pośredniego elementu sprężystego, co jest konieczne np. w tensometrycznych przetwornikach sił [1]. Ponadto ze względu na duże wartości względnych zmian indukcji magnetycznej pod wpływem naprężeń [2, 3] z sensorów magnetospężystych można uzyskiwać sygnał użytkowy dogodny do dalszego przetwarzania. Kolejną zaletą sensorów magnetospężystych jest prostota budowy oraz możliwość doboru zakresu mierzonych sił poprzez zmianę wymiarów geometrycznych rdzenia ferromagnetycznego [1]. Ponadto sensory takie, budowane na bazie niektórych nowoczesnych materiałów amorficznych mogą pracować w zakresie temperatur do 600 °C [4], czyli znacznie szerszym niż przetworniki tensometryczne.

Ze względu na te zalety sensory magnetosprężyste stwarzają duże, potencjalne możliwości wykorzystania ich w zakresie automatyki przemysłowej. Jednak możliwości te nie były do tej pory wykorzystane zarówno ze względu na brak metody umożliwiającej magnesowanie rdzenia pierścieniowego obciążonego jednorodnymi naprężeniami ścisakającymi, jak i ze względu na niedostateczną jeszcze znajomość charakterystyk magnetosprężystych nowoczesnych materiałów magnetycznie miękkich.

2. MAGNESOWANIE RDZENIA PIERŚCIENIOWEGO PODDANEGO DZIAŁANIU JEDNORODNYCH NAPRĘŻEŃ OD SIŁ ZEWNĘTRZNYCH

Głównym problemem zarówno w badaniach procesów magnesowania w obecności naprężeń jak i w praktycznym zastosowaniu zjawiska magnetosprężystego do budowy sensorów, jest opracowanie odpowiedniej metodyki zadawania naprężeń do rdzenia [5]. Metodyka obciążania rdzenia pierścieniowego przetwornika magnetosprężystego powinna przede wszystkim zapewniać wprowadzanie jednorodnych naprężeń do rdzenia pierścieniowego. Niejednorodne naprężenia w rdzeniu mogą spowodować jego uszkodzenie mechaniczne (np. pęknięcie). Ponadto niejednorodny rozkład naprężeń w rdzeniu powoduje zmniejszenie jego czułości magnetosprężystej, ponieważ łączne zmiany parametrów magnetycznych materiału są średnią zmianą stanu magnetycznego obszarów bardziej i mniej obciążonych mechanicznie [1].

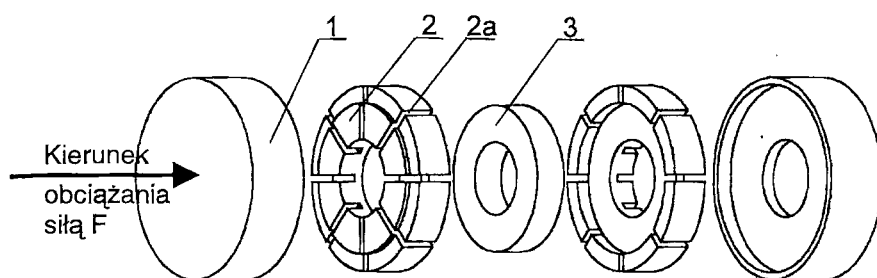
Metodyka zadawania naprężeń do rdzenia przetwornika magnetosprężystego powinna umożliwiać obciążanie rdzeni o zamkniętym obwodzie magnetycznym, w którym wytwarzane jest jednorodne pole magnesujące. W przypadku, gdy obciążany jest rdzeń o otwartym magnetowodzie, jego czułość magnetosprężysta jest mniejsza niż rdzenia zamkniętego, do którego zostały wprowadzone naprężenia o tej samej wartości. Zmniejszenie czułości magnetosprężystej rdzenia o otwartym magnetowodzie jest związane z pojawieniem się energii odmagnesowania w całkowitym bilansie energii swobodnej w magnetyku. Z tego względu wpływ naprężeń na stan magnetyczny rdzenia o otwartym magnetowodzie jest mniejszy.

Znane z literatury [2,6] metody obciążania rdzeni sensorów magnetosprężystych nie spełniają wymagań jednoczesnego wytworzenia jednorodnych naprężeń w rdzeniu o zamkniętym magnetowodzie oraz wytworzenia w nim zdefiniowanego pola magnesującego. W sensorze opracowanym przez K. Mohriego rdzeń pierścieniowy wykonany z magnetyka amorficznego był obciążany w kierunku średnicy [6]. W rdzeniu występują wtedy zarówno naprężenia ścisające jak i rozciągające, co istotnie obniża czułość przetwornika [1]. Ze względu na niejednorodny rozkład naprężeń, zakres obciążeń, które można uzyskać w rdzeniu pierścieniowym obciążanym według metody K. Mohriego jest ograniczony wytrzymałością najbardziej obciążonego fragmentu rdzenia. Z tych względów metoda ta nie może być stosowana do badania rdzeni wykonanych z kruchych magnetyków amorficznych i nanokrystalicznych.

Niedogodności przedstawionych powyżej, znanych z literatury metod spowodowały konieczność rozpoczęcia poszukiwań nowych rozwiązań w zakresie metodyki zadawania naprężeń do rdzenia pierścieniowego przetwornika magnetosprężystego. W opracowanej, nowej metodzie [7] obciążania pierścieniowych rdzeni sensorów magnetospręży-

stych naprężenia σ od siły zewnętrznej F są zadawane do rdzenia w kierunku prostopadłym do kierunku działania pola magnesującego H .

Zasadniczym problemem przy takim sposobie obciążania rdzenia pierścieniowego jest wykonanie uzwojenia. Problem ten został rozwiązany przy pomocy urządzenia przedstawionego schematycznie na rysunku 1 [7] i opisanego w zgłoszeniu patentowym [8]. Badany, obciążany rdzeń pierścieniowy (3) jest umieszczony między dwoma cylindrycznymi nakładkami (2) wykonanymi z materiału niemagnetycznego (mosiądz MO58). W nakładkach zostały wykonane nacięcia (2a) umożliwiające uzwojenie badanego rdzenia. Obciążenia ściskające przykładane są do podkładek bazowych (1).

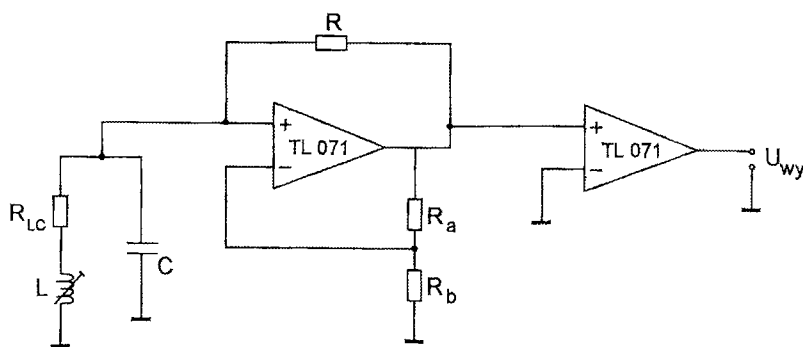


Rys. 1. Schemat urządzenia do wytwarzania naprężeń w rdzeniu pierścieniowym (zgłoszenie patentowe P-345758). 1 – podkładki bazowe, 2 – cylindryczne nakładki z materiału niemagnetycznego, 2a – nacięcia na uzwojenie, 3 – badany rdzeń

Główną zaletą opracowanej metody zadawania naprężeń ściskających do rdzenia pierścieniowego jest uzyskanie jednorodnych i zdefiniowanych naprężeń wzdłuż całego, zamkniętego obwodu magnetycznego rdzenia. Ponadto metoda ta umożliwia wykorzystanie w budowie sensorów magnetosprężystych zarówno rdzeni pierścieniowych zwijanych z cienkiej taśmy (jak ma to miejsce w przypadku nowoczesnych magnetyków amorficznych i nanokrystalicznych) oraz litych, na przykład magnetyków ceramicznych – ferrytów. Ze względu na zastosowanie rdzeni pierścieniowych, używanych do konstrukcji indukcyjnych komponentów urządzeń elektronicznych [9], do badań z wykorzystaniem opracowanej metody mogą być stosowane rdzenie produkowane seryjnie.

3. BUDOWA SENSORA MAGNETOSPŘĘŻYSTEGO

Na rysunku 2 przedstawiono konfigurację opracowanego sensora magnetosprężystego, pracującego w układzie rezonansowym z wyjściem częstotliwościowym. Rdzeń pierścieniowy sensora jest obciążany jednorodnymi naprężeniami zadawanymi według metody przedstawionej na rysunku 1.



Rys. 2. Układ elektryczny przetwornika magneto-sprężystego pracującego w układzie rezonansu równoległego LC, wraz z komparatorem

W przedstawionej konfiguracji sensora częstotliwość generatora zmienia się w wyniku zmiany indukcyjności L rdzenia (na skutek zmiany przenikalności amplitudowej) pod wpływem naprężeń σ od sił zewnętrznych. Częstotliwość sygnału wyjściowego dana jest wzorem [10]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L^2 C^2} - \left(\frac{1 - k_u}{2R_{LC}C}\right)^2} \quad (1)$$

gdzie L – indukcyjność uzwojenia na rdzeniu sensora, k_u – wzmacnienie wzmacniacza operacyjnego wyznaczone przez rezystory R_a i R_b , zaś R_{LC} opisuje straty w układzie rezonansowym, uwzględniając między innymi straty powodowane przez prądy wirowe w rdzeniu, straty na rezystancji doprowadzeń oraz straty na pętli histerezy materiału rdzenia. Ponieważ w typowym układzie pracy wzmacnienie w $k_u \approx 1$ [10], wzór (1) można uprościć do postaci $f = 1/(LC)$. W układzie elektrycznym sensora zastosowano odpowiednie, dodatnie sprzężenie zwrotne, warunkujące generowanie drgań o częstotliwości rezonansowej, przy czym amplituda sygnału wyjściowego jest ograniczona nasyceniem wzmacniacza. Zjawisko to zapewnia ustalenie się średniej wartości wzmacnienia $k_u = 1$, niezbędnej do uzyskania stanu generacji o częstotliwości f .

Główną zaletą opracowanej konfiguracji sensora magneto-sprężystego jest fakt, że uzyskiwany sygnał częstotliwościowy jest dogodny do przetwarzania cyfrowego oraz odporny na zakłócenia przy przesyłaniu. W celu uproszczenia współpracy sensora z układami cyfrowymi sinusoidalny sygnał wyjściowy z generatora LC poddawany jest komparacji, w rezultacie której zostaje zamieniony na sygnał prostokątny o tej samej częstotliwości (Rys. 2).

Ze względu na mechanizm magnesowania taśmy amorficznej pod wpływem naprężeń mechanicznych od sił zewnętrznych, zapewnienie prawidłowej pracy sensora magneto-sprężystego, zarówno dla naprężeń wzrastających jak i malejących, wymaga doboru cyklu pracy sensora odpowiednio do materiału rdzenia. W przypadku niektórych stopów amorficznych, pomiędzy kolejnymi pomiarami należy usunąć naprężenia od sił zewnętrznych i przeprowadzić rozmagnesowanie rdzenia, zaś w przypadku innych stopów rozmagnesowanie to nie jest wymagane.

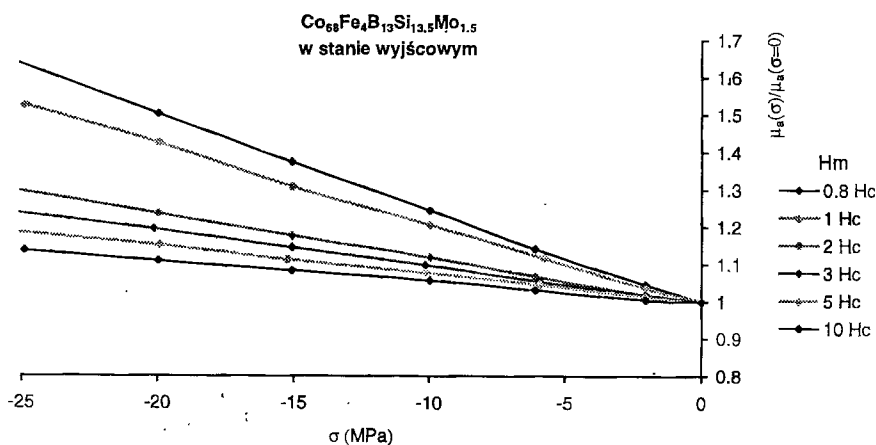
4. CHARAKTERYSTYKI UŻYTKOWE OPRACOWANYCH SENSORÓW MAGNETOSPREŻYSTYCH

Aby dokonać prawidłowego doboru materiału na rdzeń sensora magnetosprężystego, przeprowadzono badania parametrów funkcjonalnych sensorów z rdzeniami z następujących magnetyków amorficznych:

- rdzeni na bazie kobaltu o składzie chemicznym: $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{B}_{13}\text{Si}_{13,5}\text{Mo}_{1,5}$
- rdzeni na bazie żelaza, o składzie chemicznym: $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$
- rdzeni na bazie żelaza-niklu o składzie chemicznym: $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$

Badania prowadzono w stanie wyjściowym i po końcowej relaksacji termicznej (wyżarzaniu) materiału amorficznego, które jest ostatnim etapem technologicznym w produkcji rdzenia.

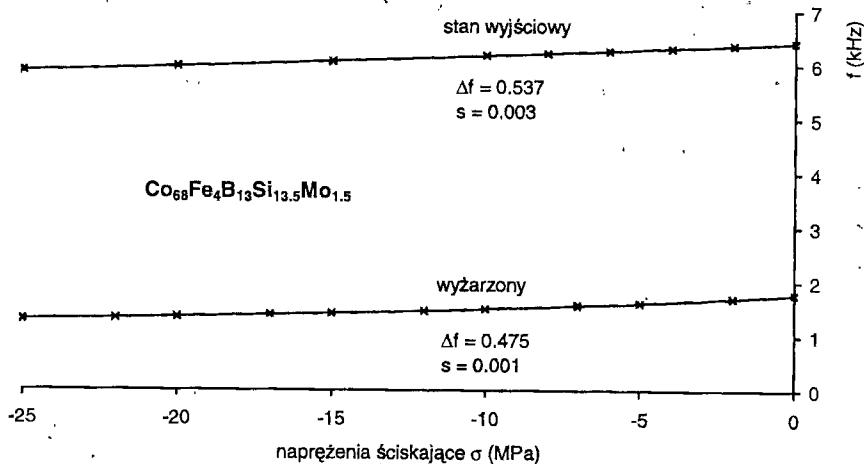
W opisanej konfiguracji sensora magnetosprężystego to wartość względnych zmian przenikalności amplitudowej μ_a określa wartość użytkowego sygnału wyjściowego sensora, czyli jego czułość. Z tego względu, przy budowie tego typu sensorów magnetosprężystych bardzo istotna jest znajomość względnych zmian amplitudowej przenikalności magnetycznej $\mu_a(\sigma)/\mu_a(\sigma=0)$ w funkcji naprężeń σ . Charakterystykę tą, w odniesieniu do stopu o składzie $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{B}_{13}\text{Si}_{13,5}\text{Mo}_{1,5}$ w stanie wyjściowym przedstawiono na rysunku 3.



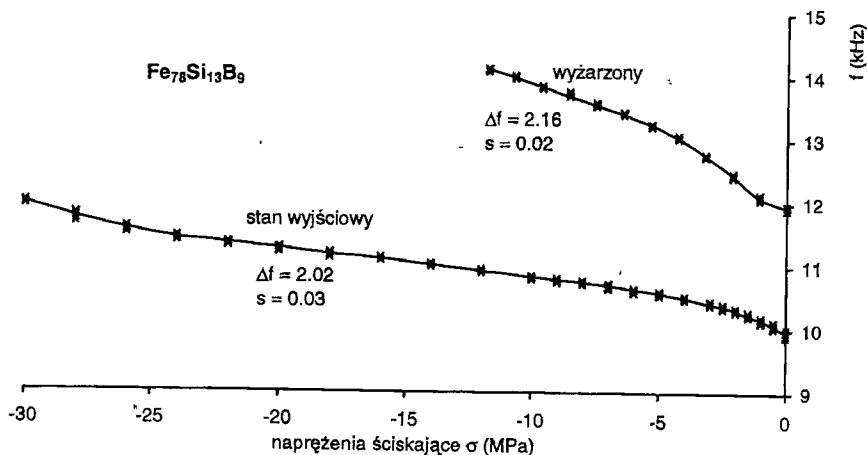
Rys. 3. Względne zmiany przenikalności amplitudowej $\mu_a(\sigma)/\mu_a(\sigma=0)$ w rdzeniu pierścieniowym ze stopu amorficznego o składzie $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{B}_{13}\text{Si}_{13,5}\text{Mo}_{1,5}$ w stanie wyjściowym (pole magnesujące H_m od 0,8 Hc do 10 Hc, gdzie Hc jest polem koercji rdzenia)

Uzyskane charakterystyki potwierdziły przewidywania w odniesieniu do wysokiej czułości magnetosprężystej stopów o strukturze amorficznej. Pod wpływem naprężeń ścisiskających w zakresie do 25MPa wartość przenikalności amplitudowej rdzenia ze stopu na bazie kobaltu ($\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{B}_{13}\text{Si}_{13,5}\text{Mo}_{1,5}$) wzrasta o ponad 70%.

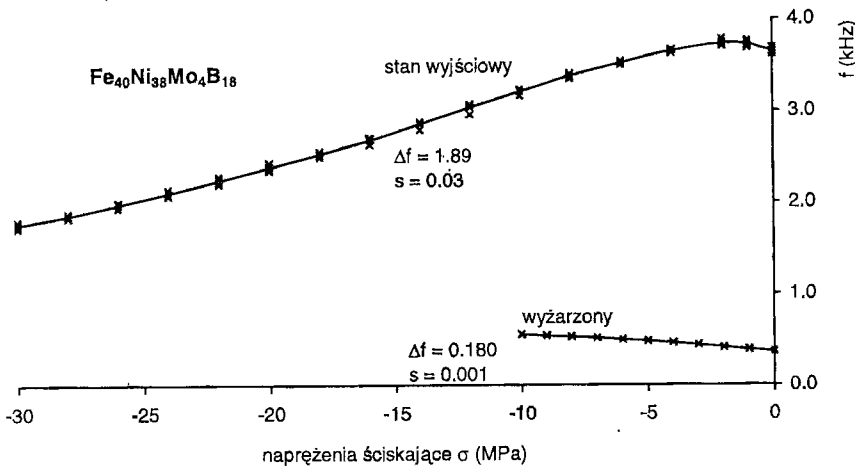
Na rysunkach 4-7 przedstawiono charakterystyki sensorów magnetosprężystych z rdzeniami z magnetyków o strukturze amorficznej. Parametry tych sensorów zebrano w tablicy 1.



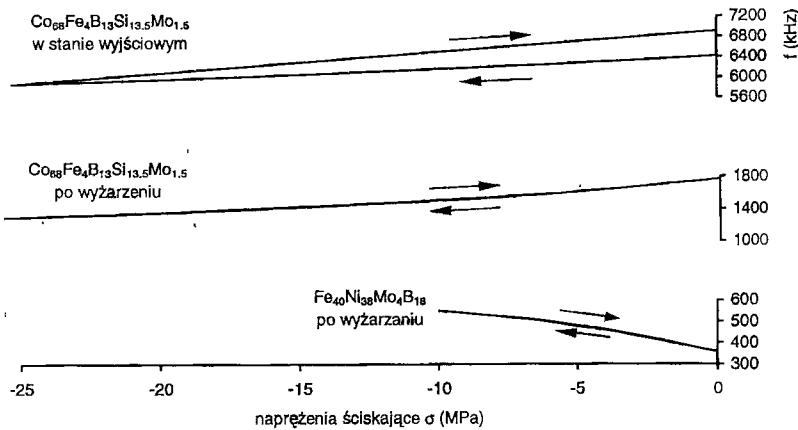
Rys. 4. Charakterystyka przetwarzania $f(\sigma)$ rezonansowego sensora magnetostrictywnego z rdzeniem ze stopu amorficznego o składzie $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{B}_{13}\text{Si}_{13.5}\text{Mo}_{1.5}$ w stanie wyjściowym i po wyżarzaniu



Rys. 5. Charakterystyka przetwarzania $f(\sigma)$ rezonansowego sensora magnetostrictywnego z rdzeniem ze stopu amorficznego o składzie $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$ w stanie wyjściowym i po wyżarzaniu



Rys. 6. Charakterystyka przetwarzania $f(\sigma)$ rezonansowego sensora magnetośprężystego z rdzeniem ze stopu amorficznego o składzie $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$ w stanie wyjściowym i po wyżarzaniu



Rys. 7. Charakterystyki przetwarzania $f(\sigma)$ sensorów magnetośprężystych z wybranymi rdzeniami amorficznymi w cyklu pracy pod wpływem naprężeń narastających i malejących

Tablica 1. Parametry funkcjonalne badanych sensorów magnetoelastycznych.

Materiał rdzenia	Stan	Zakres pracy σ_z (MPa)	Δf (kHz)	$2s$ (kHz)	$\Delta f / 2s$	$\Delta f / \sigma_z$
$\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{B}_{13,5}\text{Mo}_{1,5}$	wyjściowy	25	0,537	0,003	179	0,02
$\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{B}_{13,5}\text{Mo}_{1,5}$	po wyżarzeniu	25	0,475	0,001	475	0,02
$\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$	wyjściowy	30	2,02	0,03	67	0,07
$\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$	po wyżarzeniu	20	2,16	0,03	108	0,10
$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$	wyjściowy	30	1,89	0,03	63	0,06
$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$	po wyżarzeniu	10	0,180	0,001	180	0,02

Największe bezwzględne zmiany częstotliwości wyjściowej zaobserwowano w przypadku sensorów na bazie stopu $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$. Jednak dla rdzeni o takim składzie, zarówno w stanie wyjściowym jak i po wyżarzeniu, konieczne jest usunięcie obciążenia i przeprowadzenie rozmagnesowania przed każdym pomiarem. Stanowi to istotne ograniczenie w zastosowaniach tego typu sensorów.

W przypadku sensorów z rdzeniami o składzie $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{B}_{13}\text{Si}_{13,5}\text{Mo}_{1,5}$ zaobserwowano najwyższe wartości współczynnika $\Delta f/2s$, który z praktycznego punktu widzenia określa liczbę działek pomiarowych sensora. W szczególności sensor z rdzeniem po wyżarzeniu cechuje się najwyższą wartością współczynnika $\Delta f/2s$ oraz może pracować bez rozmagnesowania pomiędzy cyklami pomiarowymi. Z tego względu stop ten jest szczególnie przydatny w konstrukcji sensorów magnetoelastycznych. Warto zauważyć, że według danych literaturowych [11] stop o składzie $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{B}_{13}\text{Si}_{13,5}\text{Mo}_{1,5}$ powinien być niewrażliwy na naprężenia od sił zewnętrznych.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione wyniki badań dowiodły przydatności niektórych magnetyków amorficznych o strukturze amorficznej do budowy sensorów naprężeń i sił przeznaczonych do zastosowań z zakresu automatyki przemysłowej.

W zależności od zastosowanego magnetyka, magnetoelastyczne sensory rezonansowe charakteryzują się zróżnicowaną czułością, zakresem pomiarowym i powtarzalnością wskazań. Najwyższą czułość sensora uzyskano przy zastosowaniu materiału o składzie $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$ po wyżarzeniu, zaś najlepszą powtarzalność wskazań (w odniesieniu do maksymalnych zmian częstotliwości) w przypadku magnetyka o składzie $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{B}_{13,5}\text{Mo}_{1,5}$, po wyżarzeniu. Ponadto sensor na bazie $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{B}_{13,5}\text{Mo}_{1,5}$, po wyżarzeniu może pracować bez konieczności przeprowadzania rozmagnesowania pomiędzy cyklami pomiarowymi. Z tego względu wydaje się szczególnie przydatny do konstrukcji sensorów magnetoelastycznych.

Ponieważ charakterystyki przetwarzania sensorów rezonansowych są nieliniowe niezbędne jest zastosowanie mikroprocesorowych układów korygujących te charakterystyki. Z tego względu, uzyskiwany z sensorów rezonansowych sygnał częstotliwościowy jest szczególnie dogodny do przetwarzania cyfrowego oraz do przesyłania na znaczne odległości.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bieńkowski A. „Magnetosprężyste zjawisko Villariego w ferrytach i możliwość jego wykorzystania w budowie przetworników naprężeń i sił” Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995
- [2] Bydzovsky J., Kraus L., Svec P., Pasquale M., Kollar M. “Starin sensors based on stress-annealed CoFeCrSiB amorphous ribbons” Proc. Int. Conf. Eurosensors XVI, Prague, September 15-18, 2002, W2A3
- [3] Szewczyk R., Bieńkowski A., Kolano-Burian A. „Magnetosprężyste zjawisko Villariego w magnetykach amorficznych i nanokrystalicznych” Rudy i Metale Nieżelazne, R-47, 2002, str. 445-448
- [4] Kulik T., Wlazowska A., Ferenc J., Latuch J. „Magnetically soft nanomaterials for high-temperature applications” Proc. IEEE International Magnetic Conference, Piscataway, USA, 1998, pp. GC5
- [5] Bieńkowski A., Szewczyk R. „New possibility of utilizing amorphous ring cores as stress sensor” Physica Status Solidi A, no. 189, vol. 3, pp. 787-790, 2002
- [6] Mohri K., Korekoda S.: „New force transducers using amorphous ribbon cores” IEEE Trans. Magn. 14 (1978) 1071-75
- [7] Szewczyk R., Bieńkowski A. „Nowe możliwości wykorzystania amorficznych rdzeni pierścieniowych jako sensorów naprężeń i sił ściskających” Joint IMEKO TC-1 & XXXIV MKM Conference, 8-12 września 2002, Wrocław, str. 128-134
- [8] Bieńkowski A., Szewczyk R. „Urządzenie do obciążania pierścieniowego przetwornika magnetosprężystego” Zgłoszenie Patentowe P-345758, 2001.
- [9] O’Handley R. “Modern magnetic materials – principles and applications” John Wiley & sons, New York, 2000
- [10] Tietze U., Schenk C. „Układy półprzewodnikowe” WNT Warszawa 1996
- [11] Boll R., Warlimont H. “Application of amorphous magnetic materials in electronics” IEEE Trans. Magn. 17, no. 6 (1981) 3053