

WPLYW NAPRĘŻEŃ OD SIŁ ZEWNĘTRZNYCH NA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE PRZETWORNIKA TRANSDUKTOROWEGO Z RDZENIEM PIERŚCIENIOWYM

W referacie przedstawiono wyniki badań wpływu naprężeń mechanicznych od sił zewnętrznych na właściwości użytkowe przetwornika transduktorowego z rdzeniem pierścieniowym. Wyniki badań właściwości magnetooprężystych, zrealizowanych dwoma metodami, stopu o strukturze amorficznej i składzie $(\text{CoFe})_{89}(\text{MnMoSiB})_{11}$, zostały odniesione do komputerowego modelu przetwornika transduktorowego. Uzyskane zmiany wartości sygnału wyjściowego przetwornika nie przekroczyły 2%, co potwierdza między innymi przydatność stopu o składzie $(\text{CoFe})_{89}(\text{MnMoSiB})_{11}$ jako materiału na rdzenie przetworników transduktorowych.

INFLUENCE OF MECHANICAL STRESSES FROM EXTERNAL FORCES ON FUNCTIONAL PROPERTIES OF RING-CORE FLUXGATE SENSOR

Paper presents results of investigation on the influence of mechanical stresses from external forces on properties of the fluxgate sensor with ring-shaped core. Presented results of the influence of stresses on the magnetic properties of the $(\text{CoFe})_{89}(\text{MnMoSiB})_{11}$ amorphous alloy were used for computer simulation of stress sensitivity of fluxgate sensor. Changes of the output signal did not exceed 2%. This result confirms that $(\text{CoFe})_{89}(\text{MnMoSiB})_{11}$ amorphous alloy can be successfully used as the core of ring-shape fluxgate sensors.

1. WSTĘP

Magnetometry transduktorowe są szeroko stosowane do wykrywania anomalii słabych, stałych pól magnetycznych. Wykrywanie anomalii takich pól magnetycznych, a w szczególności ziemskiego pola magnetycznego znajduje szerokie zastosowanie w badaniach z zakresu geodezji, geologii oraz archeologii [1]. Ponadto analiza anomalii pola magnetycznego może być stosowana w nieniszczących badaniach elementów stalowych i aluminiowych [2].

W większości tych zastosowań magnetometr używany jest do wykrywania zaburzeń pola magnetycznego, a nie do pomiaru jego bezwzględnej wartości. Z tego względu w konstrukcji tego typu przyrządu główny nacisk musi być położony na uzyskanie jak najlepszej powtarzalności wskazań [3]. Powtarzalność ta może być istotnie zmniejszona przez zmiany właściwości magnetycznych rdzenia sondy przetwornika transduktorowego między innymi na skutek naprężeń mechanicznych wprowadzanych do rdzenia w wyniku działania sił zewnętrznych. Siły te mogą powstawać jako efekt odkształceń termicznych rdzenia i obudowy sensora lub na skutek wstrząsów przetwornika. Jest to szczególnie istotne w przypadku przenośnych magnetometrów transduktorowych, stosowanych w badaniach geologicznych, geodezyjnych lub archeologicznych, oraz w przypadku magnetometrów pracujących w warunkach przemysłowych.

Zasada pracy przetworników transduktorowych opiera się na wykorzystaniu nieliniowości krzywej magnesowania rdzenia z materiału magnetycznie miękkiego. Na rdzenie tych przetworników najczęściej stosowane są materiały o dużej przenikalności początkowej takie jak permalloy [1] lub magnetyki amorficzne [4]. Ponieważ magnetyki te cechują się wysoką przenikalnością początkową, udział energii anizotropii w ich bilansie całkowitej energii swobodnej jest niewielki. Z tego względu udział energii magnetosprężystej istotnie wpływa na stan magnetyczny materiału, czego rezultatem może być znaczna wrażliwość tego typu magnetyków na naprężenia od sił zewnętrznych.

Przy doborze materiału na rdzeń przetwornika transduktorowego, należy uwzględnić nie tylko właściwości magnetyczne rdzenia (poprzez zapewnienie odpowiednio wysokiej przenikalności magnetycznej), ale konieczna jest także optymalizacja doboru materiału rdzenia pod względem minimalizacji wpływu naprężeń mechanicznych na jego właściwości magnetyczne. Wpływ ten, znany jako magnetosprężyste zjawisko Villariego [5], jest jednym z podstawowych zagadnień fizyki zarówno tradycyjnych magnetyków o strukturze krystalicznej, jak i nowoczesnych magnetyków o strukturze amorficznej [6, 7] lub nanokrystalicznej [8]. Badania te, w aspekcie badań podstawowych, stworzyły możliwość doświadczalnej weryfikacji opracowanego, przybliżonego, fizycznego modelu zjawisk magnetosprężystych [9, 10], zaś w aspekcie użytkowym umożliwiły między innymi uwzględnienie wpływu efektu Villariego na właściwości funkcjonalne komponentów indukcyjnych urządzeń pomiarowych, w tym przetworników transduktorowych.

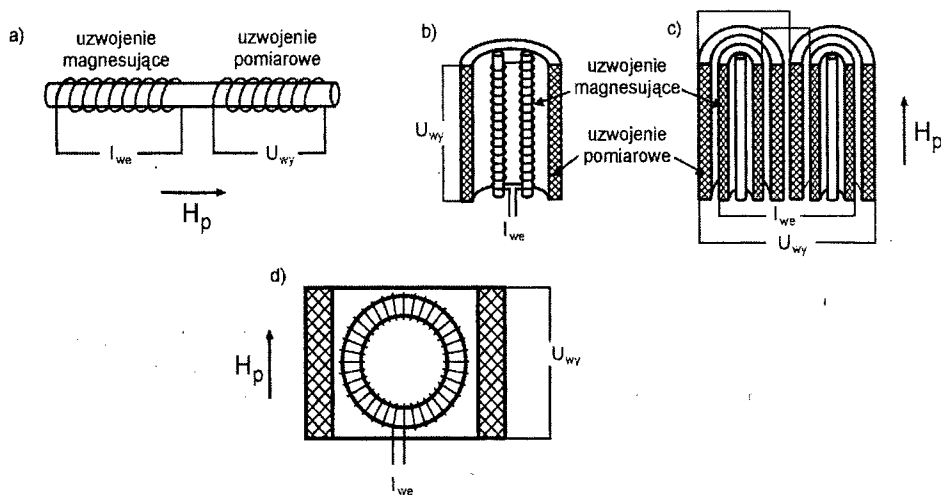
2. ZASADY PRACY PRZETWORNIKÓW TRANSDUKTOROWYCH

Podstawowe układy pracy przetworników transduktorowych [11] przedstawiono na rysunku 1. Układ elektryczny przetwornika transduktorowego obejmuje uzwojenie detekcyjne oraz jedno lub dwa uzwojenia sterujące nawinięte na rdzenie o kształcie pręcika lub pierścienia.

W przypadku wszystkich przetworników transduktorowych na uzwojenie sterujące podawany jest sinusoidalny sygnał prądowy I_{we} o częstotliwości f . Wówczas druga harmoniczna (o częstotliwości $2f$) w napięciu wyjściowym U_{wy} jest w przybliżeniu proporcjonalna do wartości pola mierzzonego H_p [3].

Znane konfiguracje przetworników transduktorowych to przetwornik jednordzeniowy, przetworniki dwurdzeniowe w układzie Vacquira oraz Foerстера oraz przetwornik z rdzeniem pierścieniowym. Przetwornik jednordzeniowy jest prosty w konstrukcji, jed-

nakże uzyskiwany na jego uzwojeniu detekcyjnym sygnał zawiera nieparzyste harmoniczne, co wymusza zastosowanie złożonych układów przetwarzania oraz obniża powtarzalność wskazań przetwornika. Przetworniki dwurdzeniowe w układzie Förstera mają czułość dwa razy wyższą od przetworników jednordzeniowych [2], jednak ze względu na podwójne uzwojenie detekcyjne wymagana jest znaczna średnica sondy pomiarowej. Przetwornik transduktorowy w układzie Vacquiera można łatwiej miniaturyzować, jednak ze względu na znaczną odległość uzwojenia detekcyjnego od rdzenia przetwornik tego typu ma niższą czułość niż przetwornik w układzie Förstera.



Rys. 1. Podstawowe konfiguracje przetworników transduktorowych [11]: a) przetwornik jednordzeniowy b) przetwornik dwurdzeniowy w układzie Vacquiera c) przetwornik w układzie Förstera d) przetwornik z rdzeniem toroidalnym. Przez H_p oznaczono kierunek działania mierzonego pola magnetycznego.

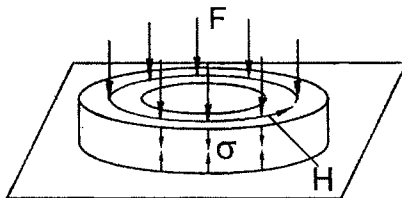
Ze względu na bardziej równomierny rozkład naprężeń, przetworniki z rdzeniami toroidalnymi są odporniejsze na działanie naprężeń mechanicznych [4] niż przetworniki z rdzeniami pręcikowymi, co podwyższa ich powtarzalność wskazań. Ponadto brak swobodnych końców rdzenia przetwornika toroidalnego obniża poziom szumów w sygnale wyjściowym, zaś niewielka zawartość nieparzystych harmonicznych upraszcza konstrukcję współpracującego z przetwornikiem elektronicznego układu pomiarowego. Dlatego nie ma potrzeby stosowania filtrów o dużej selektywności, co poprawia powtarzalność wskazań przyrządu. Ze względu na te zalety przetworniki z rdzeniem pierścieniowym są najczęściej stosowane w praktyce.

3. ZADAWANIE NAPRĘŻEŃ MECHANICZNYCH DO PIERŚCIENIOWEGO RDZENIA MAGNETYCZNEGO

Głównym problemem w badaniach wpływu naprężeń mechanicznych od sił zewnętrznych na właściwości użytkowe przetworników transduktorowych jest metodyka zadawania naprężeń do rdzenia pierścieniowego przetwornika transduktorowego. Ponieważ nie jest znana metoda umożliwiająca wprowadzenie zdefiniowanych naprężeń mechanicznych do działającego przetwornika transduktorowego, konieczne jest wyznaczenie wpływu naprężeń mechanicznych od sił zewnętrznych na właściwości magnetyczne rdzenia pierścieniowego, a następnie powiązanie tych własności (z wykorzystaniem modelu matematycznego), z właściwościami użytkowymi przetwornika transduktorowego.

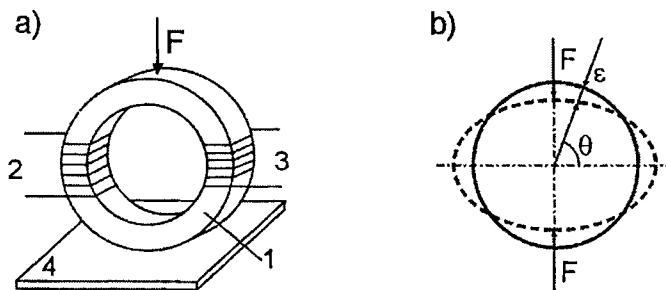
W opisanych w literaturze badaniach magnetosprężystych właściwości rdzeni pierścieniowych naprężenia mechaniczne, ściskające wprowadzano w kierunku prostopadłym do działania pola magnesującego lub w kierunku średnicy rdzenia.

Ideę zadawania naprężeń w kierunku prostopadłym do kierunku pola magnesującego rdzeń przedstawiono na rysunku 2 [12]. Ze względu na system specjalnie zaprojektowanych, niemagnetycznych podkładek [13] badany rdzeń pierścieniowy może zostać uzwojony. W przypadku zastosowania tej metody pomiarowej w rdzeniu uzyskiwany jest jednorodny i zdefiniowany rozkład naprężeń ściskających. Ponadto metoda ta stwarza możliwość badania zarówno rdzeni litych, jak i zwijanych z cienkiej taśmy, nowoczesnych magnetyków amorficznych i nanokrystalicznych.



Rys. 2. Idea metody obciążania rdzenia pierścieniowego w kierunku prostopadłym do pola magnesującego

Metodę zadawania siły ściskającej w kierunku średnicy rdzenia przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Obciążanie rdzenia pierścieniowego w kierunku średnicy: a) idea metody, b) rozkład odkształceń w rdzeniu.

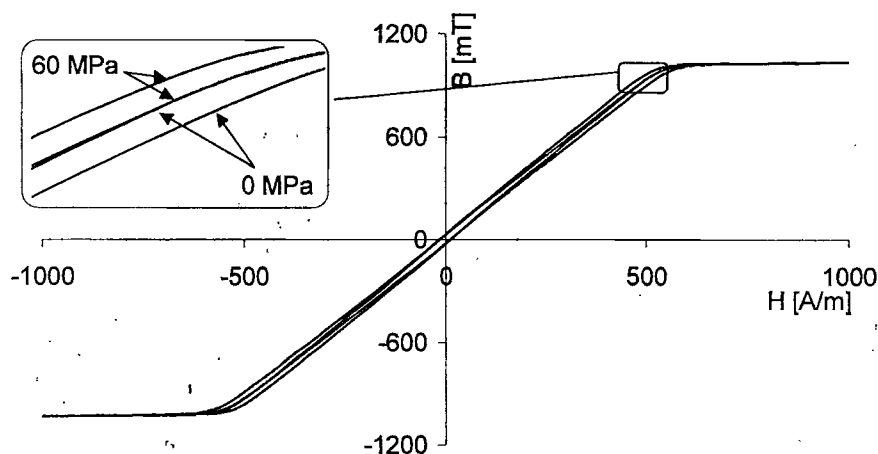
W przypadku tej metody obciążania rozkład naprężeń maksymalnych σ w rdzeniu jest dany wzorem (1), zaś rozkład odkształceń ε w rdzeniu wzorem (2) [14].

$$\sigma = \frac{3rF}{bN_1 h^2} \left(\frac{2}{\pi} - \cos\theta \right) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{3r^3 F}{EbN_1 h^3} \left(\frac{4}{\pi} - \theta \sin\theta - \cos\theta \right) \quad (2)$$

w którym przez r oznaczono średnicę obciążanego rdzenia, N_1 liczbę zwojów taśmy ze stopu amorficznego, h i b odpowiednio grubość i szerokość taśmy, E –moduł Younga materiału taśmy, zaś kąt θ określa położenie punktu w którym wyznaczane jest odkształcenie lub naprężenia. Jak dowodzi wzór (1) rozkład naprężeń w rdzeniu jest niejednorodny. Ponadto w rdzeniu występują zarówno naprężenia ściskające rozciągające.

Na rysunku 4 przedstawiono wpływ naprężeń mechanicznych, ściskających σ zadawanych w kierunku prostopadłym do pola magnesującego, na pętle histerezy magnetycznej rdzenia pierścieniowego ze stopu o strukturze amorficznej i składzie $(\text{Co-Fe})_{89}(\text{MnMoSiB})_{11}$ (produkcji Vacuumschmelze).



Rys. 4. Wpływ naprężeń mechanicznych, ściskających zadawanych w kierunku prostopadłym do pola magnesującego, na pętle histerezy magnetycznej rdzenia pierścieniowego ze stopu o składzie $(\text{CoFe})_{89}(\text{MnMoSiB})_{11}$, o strukturze amorficznej

Warto zauważyć, że pod wpływem naprężeń ściskających zadawanych w kierunku prostopadłym do pola magnesującego wartość indukcji magnetycznej w rdzeniu rośnie. Ponieważ rdzeń o składzie $(\text{CoFe})_{89}(\text{MnMoSiB})_{11}$ ma niewielką, dodatnią wartość magnetostrykcji nasycenia, wzrost ten jest potwierdzeniem energetycznego modelu zjawiska magnetosprężystego [7].

4. MODEL MATEMATYCZNY UMOŻLIWIAJĄCY WYZNACZENIE WPLYWU NAPRĘŻEŃ NA WŁAŚCIWOŚCI FUNKCJONALNE PRZETWORNIKA TRANSDUKTOROWEGO

Wyniki badań magnetoelastycznych zostały odniesione do opracowanego modelu przetwornika transduktorowego z rdzeniem pierścieniowym. W modelu tym wartość pola magnesującego w rdzeniu została wyznaczona według zależności (3):

$$H(\phi, t) = \frac{I_{in}(t) \cdot z}{l_e} + H_{meas} \cdot \sin(\phi) \quad (3)$$

przy czym I_{in} jest wartością chwilową sinusoidalnie zmiennego prądu płynącego przez uzwojenie magnesujące przetwornika, z liczbą zwojów uzwojenia magnesującego, l_e średnią drogą magnetyczną rdzenia, H_{meas} symulowaną wartością mierzonego, stałego pola magnetycznego (równą 20 A/m), ϕ kątem między osią przetwornika a promieniem wodzącym punktu rdzenia przetwornika transduktorowego, zaś t czasem.

W symulacji wykorzystano pętlę histerezy magnetycznej, będącej wynikiem badań eksperymentalnych wpływu naprężeń na właściwości magnetyczne rdzenia. Następnie wykorzystano te dane do wyznaczenia na drodze symulacji komputerowej, według wzoru (4), wartości indukcji magnetycznej B_c w rdzeniu poddanym działaniu siły zewnętrznej F :

$$B_c = B[H(t)]_{F=const.} \quad (4)$$

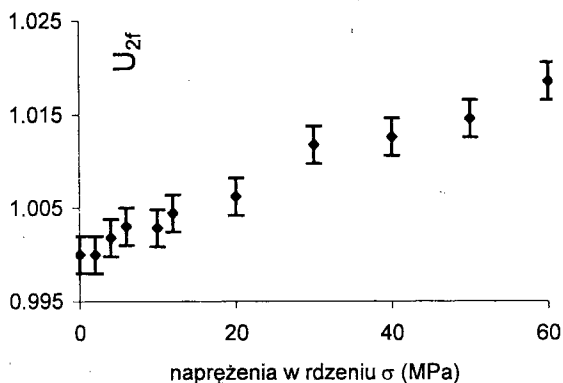
Wartość napięcia U_{out} na uzwojeniu pomiarowym została wyznaczona według wzoru (5):

$$U_{out}(t) = \frac{d\Phi}{dt} = n \frac{d(\int B_p \cdot dA)}{dt} \quad (5)$$

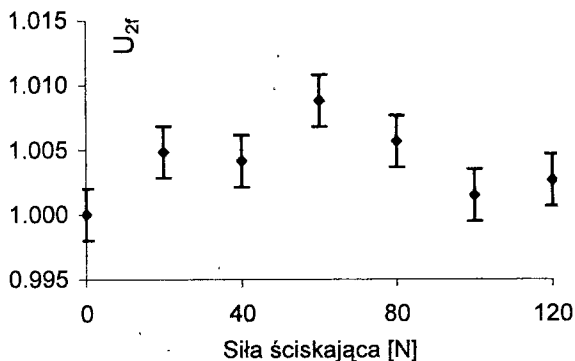
w którym Φ jest wartością strumienia indukcji magnetycznej w rdzeniu, n – liczbą zwojów uzwojenia pomiarowego, B_p prostopadłą do uzwojenia pomiarowego składową indukcji magnetycznej w rdzeniu zaś A całkowitym przekrojem poprzecznym rdzenia pierścieniowego (w kierunku równoległym do osi uzwojenia pomiarowego). Uzyskany przebieg sygnału wyjściowego poddano analizie Fouriera wyznaczając wartość amplitudy drugiej harmonicznej U_{2f} w sygnale wyjściowym.

Na rysunku 5 przedstawiono uzyskane wyniki symulacji wpływu naprężeń σ w zakresie do 60 MPa, zadawanych w kierunku prostopadłym do kierunku pola magnesującego rdzeń. Wartość amplitudy drugiej harmonicznej rośnie pod wpływem zadawanych naprężeń o około 2%.

Rysunek 6 przedstawia wyniki symulacji wpływu siły ściskającej F , zadawanej do rdzenia w kierunku jego średnicy, na amplitudę drugiej harmonicznej w sygnale wyjściowym. Pod wpływem siły o wartości do 120N amplituda sygnału wyjściowego z przetwornika wzrasta maksymalnie o około 1%.



Rys. 5. Wpływ naprężeń ściskających σ zadawanych w kierunku prostym do działania pola magnetycznego na wartość drugiej harmonicznej U_{2f} w sygnale wyjściowym przetwornika transduktorowego



Rys. 6. Wpływ siły ściskającej F zadawanej w kierunku średnicy rdzenia pierścieniowego na wartość drugiej harmonicznej U_{2f} w sygnale wyjściowym przetwornika transduktorowego

5. WNIOSKI

Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowej potwierdziły, że naprężenia od sił zewnętrznych mają istotny wpływ na właściwości użytkowe przetworników transduktorowych z rdzeniem pierścieniowym. Z tego względu czułość magnetosprężysta magnetyków amorficznych, związana z magnetosprężystym zjawiskiem Villariego, powinna być brana pod uwagę w trakcie konstrukcji transduktorowych sensorów pola magnetycznego.

Ponadto wartość wpływ naprężeń na właściwości użytkowe sensora transduktorowego zależy nie tylko od wartości przyłożonej siły, ale też od sposobu jej przyłożenia. W szczególności, gdy siła przykładana jest w kierunku średnicy rdzenia pierścieniowego rozkład naprężeń jest niejednorodny, co dodatkowo wpływa na powtarzalność wskazań sensora.

Wpływ naprężeń mechanicznych na właściwości magnetyczne amorficznego rdzenia pierścieniowego z dużą zawartością kobaltu, o składzie $(\text{CoFe})_{89}(\text{MnMoSiB})_{11}$ jest znacznie mniejszy niż wpływ naprężeń na rdzenie z dużą zawartością żelaza [7]. Z tego względu magnetyki o strukturze amorficznej i składzie $(\text{CoFe})_{89}(\text{MnMoSiB})_{11}$ jest szczególnie przydatny do konstrukcji przetworników transduktorowych o wysokiej powtarzalności wskazań.

Autorzy pragną podziękować Panu Profesorowi M. Soińskiemu z Konsorcjum Badawczo-Rozwojowego „Magneto” (będącego przedstawicielem Vacuumschmelzte Corporation w Polsce), za nieodpłatne przekazanie próbek magnetyków amorficznych.

LITERATURA

- [1] P. Ripka: Review of fluxgate sensors; *Sensors and Actuators A*, 33 (1992) p.129
- [2] G. Vertesy, A. Gasparics, A. Suvegas: Inspection of the Welded Parts of Aluminium Plates by Fluxset Type ETC Probe; European Conference on Solid State Transducers, EUROSENSRS XVI, September 15-16, Prague, Czech Republic
- [3] R. Szewczyk, A. Bieńkowski: Możliwości zmniejszenia niepewności wskazań magnetometru transduktorowego metodą programową; *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Elektryka*, z. 181, 2002, str. 175-184
- [4] W. Bornhoeft, G. Trenkler: *Magnetic Field Sensors: Fluxgate sensors*; Sensors, edited by W. Goepel et al., Vol. 5, pp. 154-203, VCH, Weinheim, 1989
- [5] E. Villari: Change of magnetization by tension and by electric current; *Ann. Phys. Chem.*, 126 (1865) p. 87
- [6] K. Mohri, S. Korekoda: New Force Transducers Using Amorphous Ribbon Cores; *IEEE Trans. Magn.*, 5 (1978) p.1071
- [7] A. Bieńkowski, R. Szewczyk: New method of characterization of magnetoelastic properties of amorphous ring cores; *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 254-255 (2003) p.67
- [8] A. Bieńkowski, R. Szewczyk, R. Kolano: Magnetoelastic Villari effect in nanocrystalline $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy; *Physica Status Solidi A*, no. 189, vol. 3, (2002) pp. 821-824,
- [9] M. J. Sablik, D. C. Jiles, *Trans. Magn.* 29 (1993) p. 2113
- [10] R. Szewczyk, A. Bieńkowski „Magnetoelastic Villari effect in high permeability Mn-Zn ferrites and modeling of this effect.” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 254-255 (2003) p. 284
- [11] Gordon D. I.: Recent advances in fluxgate magnetometry, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. Mag-8, No. 1, March 1972, s. 76-82
- [12] R. Szewczyk, A. Bieńkowski, A. Kolano-Burian „Magnetosprężyste zjawisko Villariego w magnetykach amorficznych i nanokrystalicznych” *Rudy i Metale Nieżelazne*, R-47, 2002, str. 445-448
- [13] A. Bieńkowski, R. Szewczyk „Urządzenie do obciążania pierścieniowego przetwornika magnetosprężystego” *Zgłoszenie Patentowe P-345758*, 2001.
- [14] Mohri K., Sudoh E.: Sensitive force transducers using a single amorphous core multivibrator bridge; *IEEE Trans. Magn.* 15 (179) pp. 1806-8