mgr inż. Piotr Frydrych[1)], prof. nzw. dr hab. inż. Roman Szewczyk[2)], dr inż. Jacek Salach[1)], mgr inż. Krzysztof Trzcinka[2)]
[1)] Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej
[2)] Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

Miniaturowe, dwuosiowe czujniki pola magnetycznego z rdzeniami z magnetyków amorficznych

W artykule przedstawiono koncepcję budowy dwuosiowych, transduktorowych czujników pola magnetycznego z rdzeniami z taśmy amorficznej. Jednocześnie przedstawiono nowatorską metodę kształtowania i badania charakterystyk magnesowania rdzeni ramkowych z taśmy amorficznej, wykorzystywanych jako rdzenie badanych czujników. Metoda ta umożliwia pomiar anizotropii magnetycznej rdzenia. Informacja o wartości anizotropii jest niezbędna przy budowie czujników dwuosiowych, a opisane do tej pory metody nie umożliwiały tego typu pomiarów.

MINIATURIZED, TWO AXIS MAGNETIC FIELD SENSORS WITH AMORPHOUS ALLOY CORES

Paper presents new conception of two-axis, fluxgate magnetic field sensors for measurements of Earth's magnetic field. Developed sensors utilizes soft amorphous alloys. Moreover paper presents new methodology of shaping and testing of magnetic characteristics of frame-shaped amorphous alloys cores utilized in such sensors. Presented methodology of testing enables direct measurements of magnetic anisotropy of amorphous alloy, what is required for development of two-axis fluxgate sensors.

1. WPROWADZENIE

Pierwsze w historii, praktyczne wykorzystanie pom iarów ziem skiego pola m agnetycznego zostało opisane w ksi ążce Zhu Yu „Rozm owy przy stole w Pingzhou" wydanej w 1119 roku w Chinach. Od tego czasu czujniki do detekcji i pom iaru pola m agnetycznego są przedm iotem ciągłych badań i prac rozwojowych. Jednak do tej pory wielu zagadnie ń technicznych nie udało się ostatecznie rozwiązać.

Szczególnie wa żnym obszarem rozwoju czujników do pom iaru pola m agnetycznego s ą miniaturowe czujniki do pom iaru pól m agnetycznych o nat ężeniu do oko ło 100 A/m , w szczególności ziem skiego pola m agnetycznego. Pom iary tego pola m ają zasadnicze znaczenie w pom iarach geodezyjnych [1], nawigacyjnych [2] oraz pom iarach na potrzeby systemów bezpiecze ństwa publicznego, szczególnie detekcji m etalowych elem entów urz ądzeń pirotechnicznych [3].

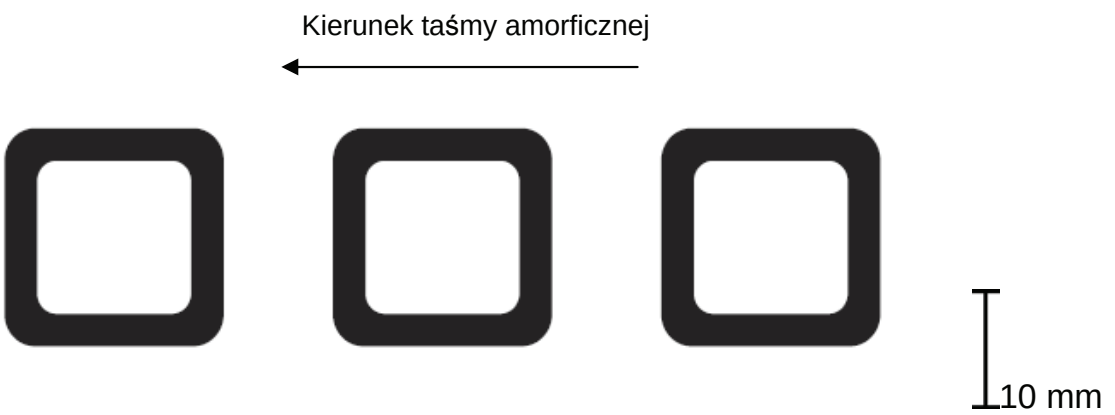
Z technicznego punktu widzenia, do pom iaru pola m agnetycznego w zakresie do 100 A/m mogą by ć wykorzystywane czujniki m agnetorezystancyjne [4], czujniki typu SQUID [5], czujniki optomagnetyczne [6] i czujniki transduktorowe [7]. Jednak m ożliwości zastosowania czujników SQUID i czujników optom agnetycznych w systemach na potrzeby bezpieczeństwa publicznego s ą bardzo ograniczone, ze wzgl ędu na ich znaczn ą ma sę oraz, w przypadku czujników SQUID, konieczno ści zapewnienia m ożliwości pracy nadprzewodnikowego elementu sensorowego w temperaturze 4 K (ciekłego helu). Dlatego w systemach na potrzeby

bezpieczeństwa publicznego są wykorzystywane czujniki magnetorezystancyjne i transduktorowe. Jednak czujniki magnetorezystancyjne, ze względu na konieczność zastosowania cewek ortogonalnych wytwarzających pole magnetyczne o znacznym natężeniu [8], są dość energochłonne. Szczególnie jest to niekorzystne w przypadku systemów mobilnych. Powoduje to konieczność dalszego rozwoju czujników transduktorowych, w szczególności w zakresie ich miniaturyzacji i doskonalenia technologii wytwarzania rdzeni stosowanych do ich budowy.

W referacie przedstawiono nową koncepcję budowy miniaturowych, grubowarstwowych czujników transduktorowych, z rdzeniami ze stopów amorficznych, umożliwiających dwuosiowy pomiar pola magnetycznego. Do tej pory tego typu czujniki umożliwiały wyłącznie jednoosiowy pomiar pola magnetycznego [9]. Barierą w opracowaniu dwuosiowych czujników transduktorowych był brak możliwości pomiaru charakterystyk magnetycznych magnetyków amorficznych w kierunku prostopadłym do kierunku taśmy. W referacie przedstawiono także taką metodę, co otworzyło możliwość opracowania czujników dwuosiowych, nie prezentowanych do tej pory w literaturze światowej.

2. WYTWARZANIE MINIATUROWYCH RDZENI RAMKOWYCH Z TAŚM AMORFICZNYCH

Amorficzne stopy ultraszybkochłodzone uzyskiwane są w formie taśm o grubości około 25 μm [10]. Taśmy te cechują się znaczną twardością i kruchością, co ogranicza możliwość wycinania kształtek rdzeni, w szczególności na skalę przemysłową. Z tego względu w opracowanej technologii produkcji kształtek rdzeni opracowywanych grubowarstwowych czujników transduktorowych zastosowano metodę fotolitograficzną. Wygląd matrycy do fotolitograficznej produkcji rdzeni czujników transduktorowych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Matryce do fotolitograficznej produkcji rdzeni ramkowych ze stopów amorficznych

W procesie produkcji rdzeni ramkowych, taśmy ze stopu amorficznego o składzie $Fe_{78}Si_{13}B_9$ (Metglas 2605 wyprodukowanego przez firmę Hitachi Metals) o szerokości taśmy 28 mm pokryto z jednej strony lakierem, a z drugiej strony warstwą światłoczułą Positiv20. Następnie warstwę światłoczułą naświetlono promieniowaniem UV przez matrycę przedstawioną na rys. 1. W kolejnej fazie, taśmy ze stopu amorficznego wytrawiono w roztworze nadsiarczanu sodowego, utrzymywanego w stabilizowanej temperaturze 55 ^{o}C. Następnie, po wy-

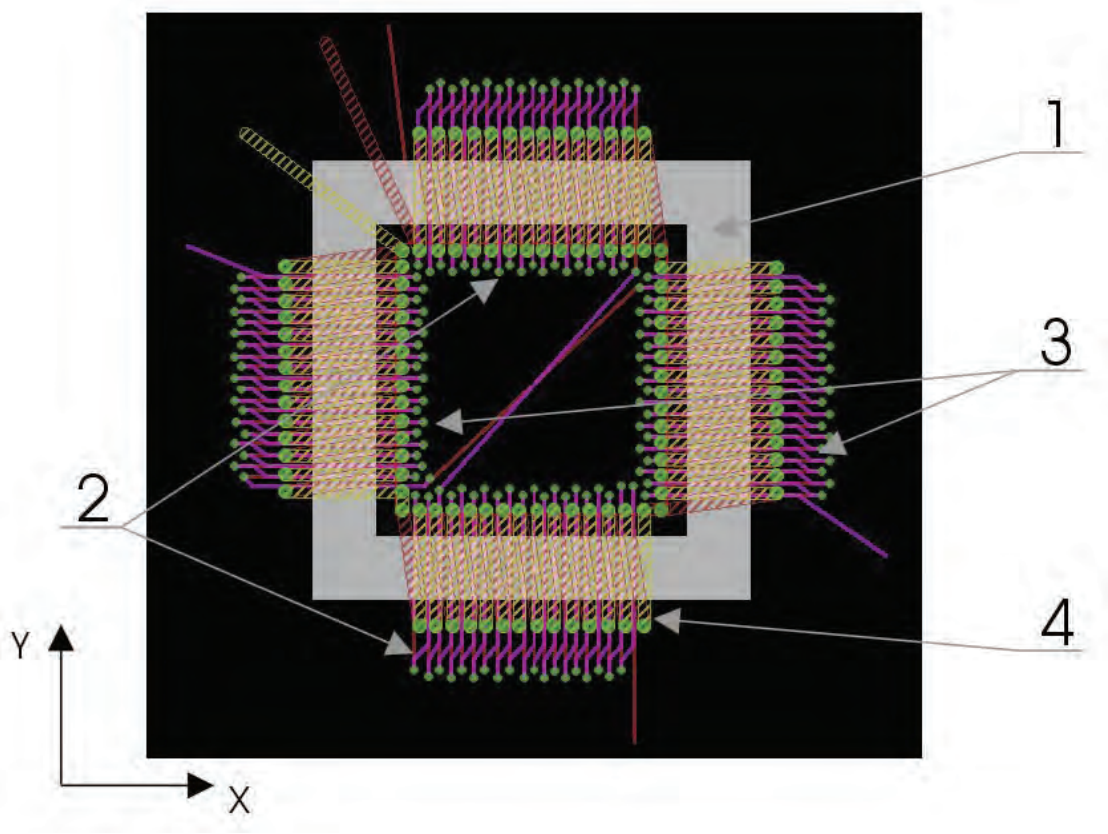
płukaniu, zbędne warstwy światłoczułe i lakierowe zostały zmyte rozpuszczalnikiem typu nitro.

Opracowana metoda umożliwia swobodne kształtowanie rdzeni z taśm amorficznych o zróżnicowanym składzie (zarówno stopów na bazie żelaza, jak i niklu oraz kobaltu). Właściwy dobór parametrów technologicznych procesu wytrawiania umożliwił uzyskanie gładkich krawędzi produkowanych rdzeni, jak również wysoki stopień powtarzalności produkcji.

3. NOWA METODA BADAŃ ANIZOTROPII MAGNETYCZNEJ

Pomiar charakterystyk magnesowania taśm magnetycznych odbywa się dla rdzeni zwijanych. Metoda ta umożliwia jedynie pomiar charakterystyki magnesowania w kierunku taśmy, przez co nie ma możliwości pomiaru anizotropii magnetycznej rdzenia.

Pomiary charakterystyki magnesowania rdzeni ramkowych trawionych z taśmy amorficznej nie mogą być zrealizowane poprzez nawinięcie uzwojenia na rdzeń. Rdzeń z taśmy amorficznej jest zbyt wiotki. Dlatego konieczne jest umieszczenie wytrawionego rdzenia wewnątrz sześciowarstwowej płytki drukowanej i wykonie uzwojeń w formie ścieżek na płytce, tak jak to przedstawiono na rys. 2.



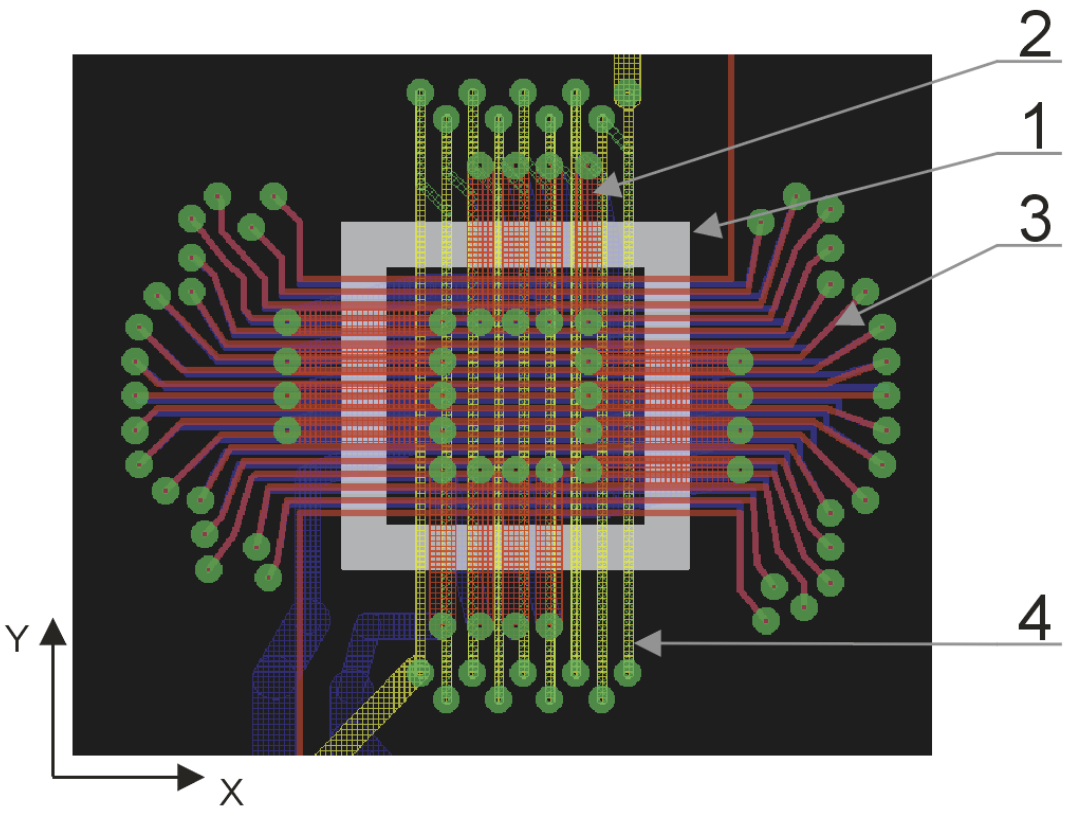
Rys. 2. Rdzeń ramkowy wraz z uzwojeniem w formie ścieżek sześciowarstwowej płytki drukowanej: 1 – rdzeń ramkowy, 2 – uzwojenie pomiarowe w osi *Y*, 3 – uzwojenie pomiarowe w osi *X*, 4 – uzwojenie magnesujące

W opracowanym układzie pomiarowym uzwojenie magnesujące zasilano ze źródła prądowego typu BOP36 firmy Kepco sterowanego napięciem. Sterowanie napięciowe odbywało się z generatora funkcyjnego AFG3021B firmy Tectronics. Ze względu na niewielki przekrój

taśmy ze stopu amorficznego, sygnał indukowany na uzwojeniach pomiarowych jest słaby. Dlatego w torze pomiarowym zastosowano dwa ultraszybkie, niskoszumne wzmacniacze operacyjne OPA637 firmy Analog Devices. Następnie, wzmocnione sygnały pomiarowe z uzwojeń pomiarowych w osiach X i Y oraz sygnał napięciowy proporcjonalny do prądu sterującego transduktor podawano na oscyloskop cyfrowy i przesyłano do komputera PC. W tym komputerze, w fazie analizy wyników pomiarów, realizowano całkowanie numeryczne, które umożliwiało wyznaczenie wartości indukcji magnetycznej w rdzeniu zarówno w osi X, jak i w osi Y. Błąd wyznaczenia wartości indukcji pola magnetycznego B oszacowano na 30% między innymi ze względu na problemy z pomiarem grubości taśmy spowodowane jej niejednorodnością.

4. BUDOWA CZUJNIKA TRANSDUKTOROWEGO W TECHNOLOGII GRUBOWARSTWOWEJ

Na rys. 3 przedstawiono budowę miniaturowego czujnika transduktorowego o wymiarach 35 mm x 35 mm x 1mm, umożliwiającego dwuosiowy pomiar pola magnetycznego. Uzwojenie magnesujące (2) w tym czujniku wykonano tak samo jak uzwojenie magnesujące w układzie przedstawionym na rys. 2. Natomiast uzwojenia pomiarowe (3) i (4) (uzwojenia wyjściowe czujnika transduktorowego) w osi X i w osi Y oplatają cały czujnik.



Rys. 3. Opracowany miniaturowy, dwuosiowy czujnik transduktorowy: 1 – rdzeń czujnika, 2 – uzwojenie magnesujące Y, 3 – uzwojenie pomiarowe w osi X, 4 – uzwojenie pomiarowe w osi Y

W rezultacie działania pola mierzonego H_p, przebiegi indukcji w kolumnach rdzenia ramkowego odkształcają się niesymetrycznie. Dlatego w strumieniach magnetycznych $\Psi_x(t)$ i $\Psi_Y(t)$

skojarzonych z uzwojeniami pomiarowymi w osi X i osi Y (obejmującymi obie kolumny rdzenia ramkowego w danej osi) pojawia się składowa o częstotliwości dwa razy większej od częstotliwości przebiegu prądowego podawanego na uzwojenie sterujące. W zakresie niewielkich, stałych pól mierzonych H_p, amplituda tej drugiej harmonicznej jest proporcjonalna do mierzonego pola H_p. Zasada pracy przetwornika transduktorowego została opisana szczegółowo w pracach [11] i [12].

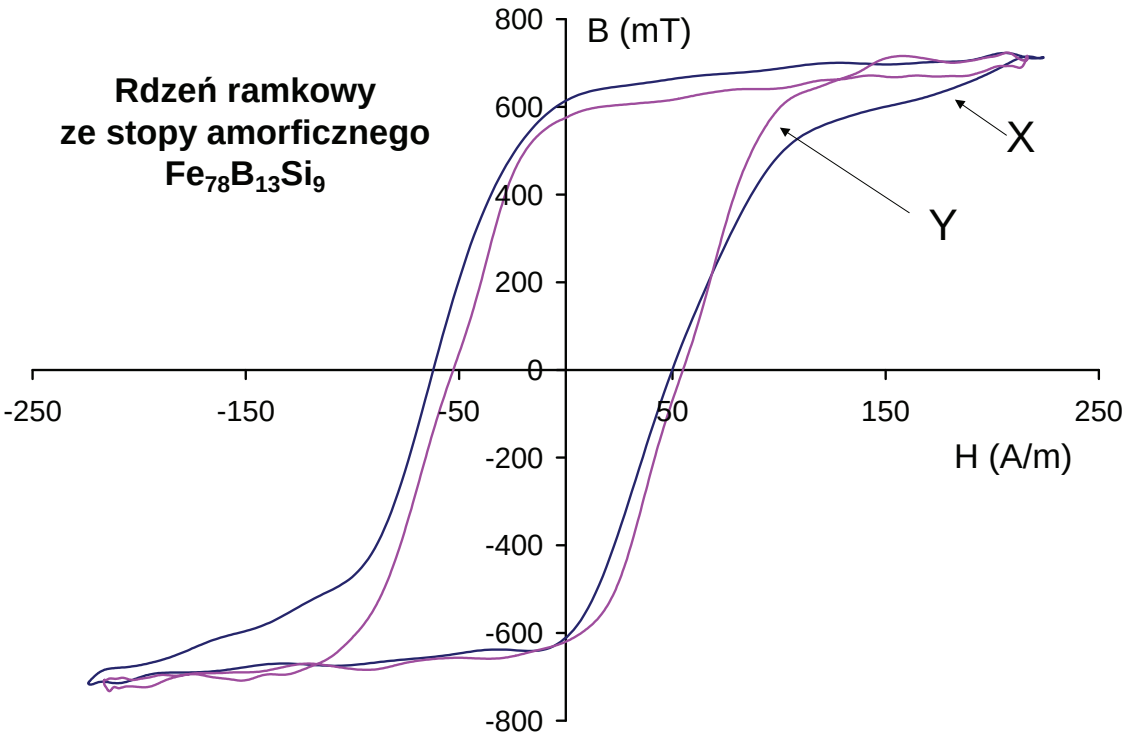
Przetwornik transduktorowy umieszczono w cewkach Helmholtza umożliwiających precyzyjne zadawanie wzorcowego pola magnetycznego w zakresie do 100 A/m. Uzwojenie magnesujące czujnika zasilano ze źródła prądowego typu BOP36 firmy Kepco sterowanego napięciem. Sterowanie napięciowe odbywało się z generatora funkcyjnego AFG3021B firmy Tectronics. Natomiast w torze pomiarowym zastosowano precyzyjne wzmacniacze operacyjne OP27, zarówno dla toru pomiarowego w osi X jak i w osi Y. Zastosowanie ultraszybkich wzmacniaczy operacyjnych OPA637 nie było konieczne, ponieważ sygnałem wyjściowym z sensora jest druga harmoniczna prądowego przebiegu zasilającego o częstotliwości 1kHz. Filtrację i pomiar drugiej harmonicznej z przebiegu sygnału wyjściowego z czujnika zrealizowano cyfrowo, po zarejestrowaniu tego sygnału na oscyloskopie cyfrowym.

5. WYNIKI BADAŃ CHARAKTERYSTYK RDZENIA AMORFICZNEGO ORAZ CZUJNIKA TRANSDUKTOROWEGO

Na rys. 5 przedstawiono pętle histerezy magnetycznej $B(H)$ rdzenia ramkowego z taśmy amorficznej ze stopu o składzie $Fe_{78}Si_{13}B_9$ w stanie wyjściowym (bez dodatkowej obróbki cieplnej) zmierzone przy częstotliwości sinusoidalnie zmiennego natężenia pola magnesującego równej 1200 Hz. Należy podkreślić, że pętle histerezy zarejestrowane w osi X i w osi Y mają zbliżony kształt. Jest to sprzeczne z powszechnie przyjętym poglądem, że charakterystyki magnesowania taśmy amorficznej są znacząco różne w kierunku taśmy i w kierunku prostopadłym do kierunku taśmy [10]. Ewentualna silna anizotropowość taśmy może być spowodowana przez naprężenia mechaniczne indukowane w trakcie procesu ultraszybkiego chłodzenia przy odlewaniu taśmy. W takim przypadku gęstość energia anizotropii indukowanej naprężeniami może być wyznaczona z zależności [13]:

$$K_\sigma = \frac{3}{2}\lambda_s \sigma \tag{1}$$

w której λ_s to magnetostrykcja nasycenia materiału, zaś σ – wartość naprężeń. Ponieważ stop amorficzny o składzie $Fe_{78}Si_{13}B_9$ w stanie wyjściowym cechuje się magnetostrykcją około 30 μm/m, należy przypuszczać, że niewielka gęstość energii anizotropii naprężeń K_σ wynika z faktu, że naprężenia własne wytworzone w czasie produkcji taśmy amorficznej z czasem uległy, relaksacji.

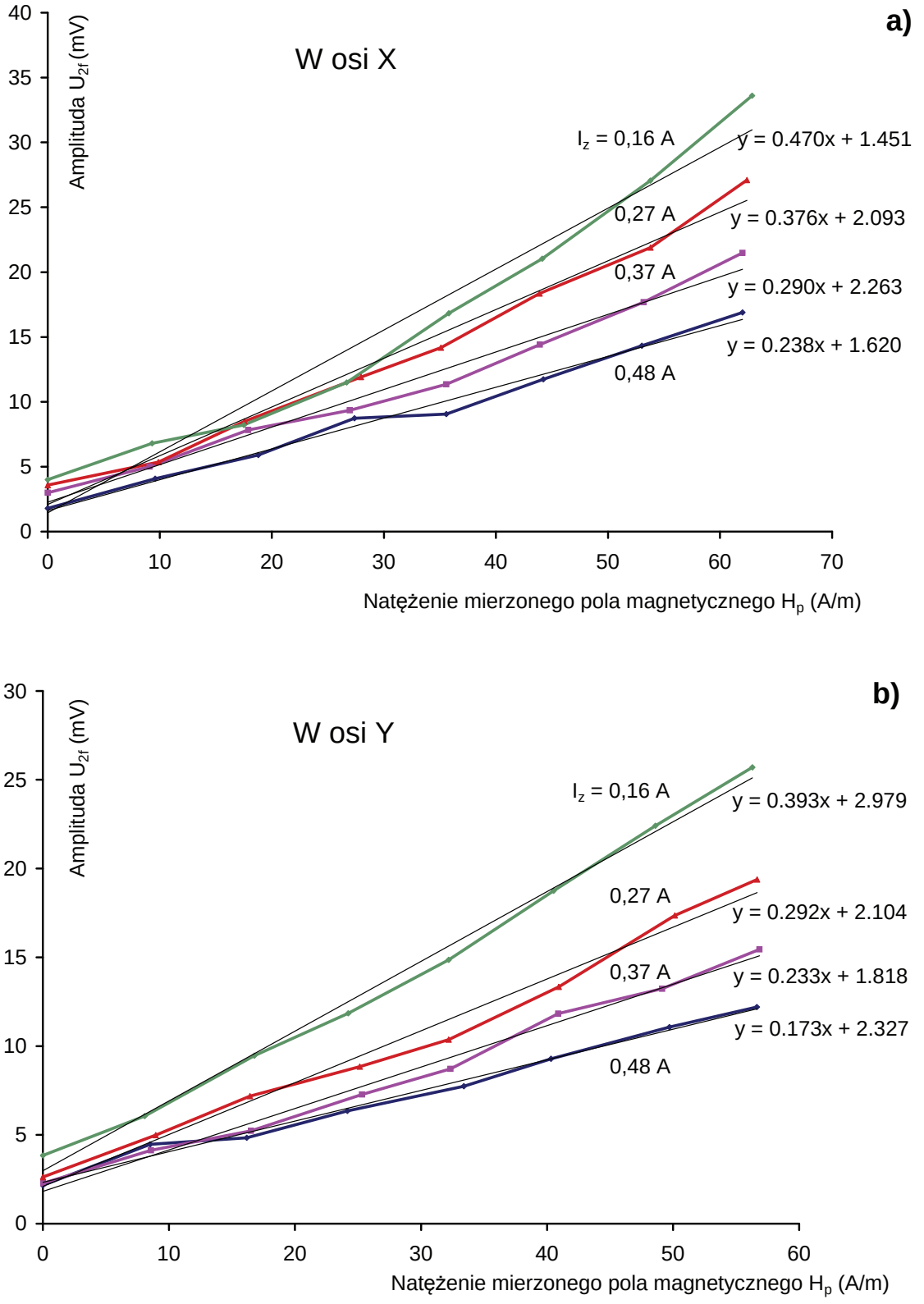


Rys. 5. Pętle histerezy magnetycznej B(H) taśmy ze stopu o składzie $Fe_{78}Si_{13}B_9$ w stanie wyjściowym, mierzone w kierunkach X i Y

Przedstawione na rys. 5 charakterystyki magnesowania *B(H)* taśmy ze stopu o składzie $Fe_{78}Si_{13}B_9$ w stanie wyjściowym dowodzą, że rdzenie z tego materiału mogą być wykorzystywane do opracowania czujników transduktorowych do pomiaru pola magnetycznego w dwóch osiach. Do tej pory czujniki takie nie były opracowane, ze względu na niesłuszne oczekiwanie silnej anizotropii taśmy ze stopu o składzie $Fe_{78}Si_{13}B_9$. Należy podkreślić, że poglądy te nie mogły być do tej pory zweryfikowane eksperymentalnie ze względu na brak metodyki pomiaru charakterystyk magnesowania taśm amorficznych w dwóch osiach.

Na rys. 6 przedstawiono charakterystyki przetwarzania opracowanego, dwuosiowego, miniaturowego czujnika transduktorowego, zróżnicowane ze względu na wartość skuteczną sinusoidalnego przebiegu prądu I_z zasilającego uzwojenie magnesujące. Analizowanym sygnałem wyjściowym z czujnika jest amplituda drugiej harmonicznej przebiegu zasilającego U_{2f}, filtrowana z przebiegu uzyskiwanego na uzwojeniu pomiarowym.

Uzyskane wyniki potwierdzają wysoką czułość opracowanego czujnika transduktorowego zarówno w osi *X*, jak i w osi *Y*, w szerokim zakresie pól mierzonych H_p. Ponadto wyższa czułość uzyskiwana jest dla mniejszych wartości skutecznych prądu zasilającego czujnik, co jest zgodne z oczekiwaniami i może być wykorzystane do redukcji mocy zasilania niezbędnego do pracy czujnika.



Rys. 6. Charakterystyki przetwarzania opracowanego czujnika transduktorowego zró żnicowane na wartość skuteczną prądu zasilającego I_z: a) w osi X, b) w osi Y

.

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w referacie metoda fotolitograficznej produkcji miniaturowych rdzeni z taśmy amorficznej umożliwia wytwarzanie rdzeni ramkowych ze stopu o składzie $Fe_{78}Si_{13}B_9$. Rdzenie te cechują się gładkimi krawędziami i mogą być wykorzystywane w opracowywaniu różnego typu czujników, nie tylko czujników transduktorowych.

Nowatorska metodyka pomiaru charakterystyk magnesowania ramkowych rdzeni z magnetyków amorficznych umożliwiła weryfikację pogląd ów odnośnie wartości gęstości energii anizotropii w magnetyku amorficznym. Gęstość energii anizotropii taśmy okazała się na tyle niewielka, że czujniki transduktorowe mogą pracować zarówno z wykorzystaniem kolumn rdzenia ramkowego w kierunku taśmy, jak i w kierunku prostopadłym do kierunku taśmy.

Opracowane egzemplarze czujników transduktorowych umożliwiły praktyczną weryfikację ich parametrów funkcjonalnych. Zarówno charakterystyki opracowanych czujników w kierunku X, jak i w kierunku Y cechują się wysoką czułością. Ponadto czułość przetwarzania czujników transduktorowych rośnie dla mniejszych wartości skutecznych prądu zasilającego czujnik, co może być wykorzystane do redukcji mocy zasilania niezbędnego do pracy czujnika.

BIBLIOGRAFIA

1. M. G. Drahor, T. Kurtulmus, M. Berge, M. Hartmann M. Speidel „Magnetic imaging and electrical resistivity tomography studium in a Roman military installation fund in Satala archeological site, northeastern Anatolia, Turkey" Journal of Archeological Science 35 (2008) 259.
2. R. Szewczyk, J. Salach, A. Bieńkowski, R. Kłoda, M. Safinowski „Testing of the three axis magnetometers for measurements of the earth magnetic field" Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems 4 (2009) 96.
3. P. Ripka, A. M. Lewis, J. Kubik „Mine Detection in Magnetic Soils" Sensor Letters 5 (2007) 15–18.
4. S. Tumański „Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne" Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
5. Z. Dunajski „Biomagnetyzm", WKŁ, Warszawa,1990.
6. D. Gordon, R. Brown, J. Haben „Methods for measuring the magnetic field" IEEE Trans. Magn. 8 (1972) 48.
7. P. Ripka "Review of fluxgate sensors" Sensors and Actuators A33 (1992) 129.
8. S. Tumański „Czujniki pola magnetycznego – stan obecny i kierunki rozwoju" Przegląd Elektrotechniczny 2 (2004) 74.
9. P. Ripka „Magnetic Sensors and Magnetometers" Artech 2001.
10. R. O'Handley "Modern magnetic materials – principles and applications" John Wiley & sons, 2000.
11. F. Primdahl "The fluxgate mechanism" IEEE Trans. Magn .6 (1970) 376.
12. G. Musmann, Y. Afanasiev „Fluxgate magnetometers for space research" BoD, 2010.
13. E. Tremolet „Magnetostriction" CRC Press, London, 1992.