

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

mgr inż. Jacek Salach, Marcin Safinowski  
Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych  
Politechniki Warszawskiej

## NOWE PRZETWORNIKI TRANSDUKTOROWE W KONFIGURACJI VACQUIERA Z RDZENIAMI Z TAŚMY AMORFICZNEJ

*W referacie przedstawiono nowe rozwiązanie konstrukcyjne przetwornika transduktorowego z rdzeniem wykonanym z taśmy z materiału amorficznego. Przeprowadzenie procesu wyzarzania taśmy zwiniętej w walec umożliwiło trwale nadanie jej kształtu odpowiedniego dla rdzenia przetwornika transduktorowego w konfiguracji Vacquiera. Opracowany przetwornik umożliwia pomiar stałego pola magnetycznego w zakresie  $\pm 70 \mu\text{T}$  z błędem powtarzalności wskazań poniżej  $0.5 \mu\text{T}$  co jest wystarczające w większości aplikacji geodezyjnych i nawigacyjnych oraz zastosowań w badaniach nieniszczących.*

### NEW FLUXGATE SENSOR IN VACQUIER CONFIGURATION WITH AMORPHOUS MATERIAL CORE

*Paper presents new solutions in the area of development of fluxgate sensors in Vacquier configuration. In this solution ribbon-shaped amorphous magnetic cores are utilized as sensor's core. Due to thermal annealing of rolled ribbon, the permanent cylindrical shape was achieved. As a result developed fluxgate transducer creates possibility of measurement of constant magnetic field in range  $\pm 70 \mu\text{T}$  with repeatability better than  $0.5 \mu\text{T}$ . Such functional parameters are sufficient for most geodetic, navigation as well as non-destructive testing applications.*

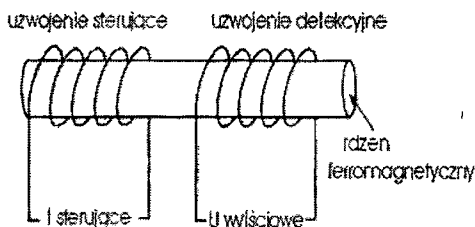
### 1. WSTĘP

Wykrywanie anomalii stałych pól magnetycznych w zakresie  $\pm 70 \mu\text{T}$ , a w szczególności ziemskiego pola magnetycznego znajduje szerokie zastosowanie w badaniach z zakresu geodezji, geologii i archeologii [1] w magnetycznych, nieniszczących badaniach elementów ferromagnetycznych i nieferromagnetycznych lecz przewodzących prąd [2]. W badaniach tych stosuje się najczęściej przetworniki magnetorezystancyjne lub transduktorowe. Pomimo, że przetworniki magnetorezystancyjne mogą być wykonane w technologii grubowarstwowej (co znacznie zmniejsza ich koszt i wymiary) nie umożliwiają one pomiaru kierunku pola magnetycznego, a jedynie pomiar skalarny. Znacznie obniża to ich parametry funkcjonalne przy wykrywaniu zaburzeń pola magne-

tycznego [3]. Z tego względu przetworniki transduktorowe znajdują ciągłe zastosowania praktyczne, mimo że pryncypia ich konstrukcji nie uległy istotnej zmianie przez ponad 60 lat.

## 2. BUDOWA PRZETWORNIKÓW TRANSDUKTOROWYCH

Najprostszy, jednordzeniowy przetwornik transduktorowy został przedstawiony na rysunku 1. Przetwornik ten składa się z uzwojenia sterującego, detekcyjnego oraz rdzenia z materiału magnetycznie miękiego, który sprzęga magnetycznie oba uzwojenia [4].



Rys. 1 Schemat budowy jednordzeniowego przetwornika transduktorowego [4]

Na uzwojenie sterujące przetwornika transduktorowego podawany jest prądowy przebieg sinusoidalnie zmienny, przez co wytwarzane jest w nim pole magnesujące  $H_s(t)$ . Jeśli natężenie prądu wynosi  $I_s(t)$  to natężenie pola magnesującego  $H_s(t)$  może być wyznaczone z zależności:

$$H_s(t) = k \cdot \frac{z}{l} \cdot I_s(t) \quad (1)$$

gdzie:  $z$  – liczba zwojów cewki,  $l$  – długość uzwojenia,  $k$  – współczynnik korekcyjny zależny od wymiarów cewki.

W trakcie pomiarów rdzeń przetwornika jednordzeniowego magnesowany jest polem  $H(t)$ , które jest sumą zmiennego pola magnetycznego  $H_s(t)$  wytwarzanego przez uzwojenie magnesujące oraz zewnętrznego, stałego pola mierzonego  $H_m$ :

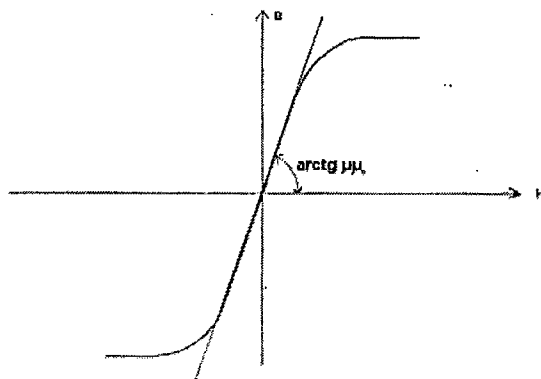
$$H(t) = H_m + H_s(t) \quad (2)$$

W rezultacie magnesowania w rdzeniu powstaje indukcja magnetyczna  $B$  dana zależnością:

$$B(t) = \mu(H(t)) \mu_0 H(t) \quad (3)$$

gdzie  $\mu(H)$  jest wartością względnej przenikalności magnetycznej rdzenia w funkcji pola magnesującego  $H$ .

Dla uproszczenia analizy krzywą zależności wartości indukcji  $B$  od natężenia pola magnesującego  $H$  można przedstawić za pomocą charakterystyki  $B=f(H)$  pokazaną na rysunku 2. W zależności tej pominięto histerezę magnetyczną rdzenia, a przybliżenia zależności dokonano za pomocą funkcji Langevina, co jest powszechnie przyjętą praktyką w zakresie modelowania magnetycznych krzywych bezhisterezowych [5].



Rys. 2. Uproszczona, bezhisterezowa zależność indukcji magnetycznej  $B$  od natężenia pola magnetycznego  $H$

Cykliczna zmiana indukcji w rdzeniu wytwarza w uzwojeniu detekcyjnym przetwornika transduktorowego siłę elektromotoryczną, która jest dana zależnością:

$$u_w(t) = -k \cdot z \cdot s \frac{d}{dt} B(t) \quad (4)$$

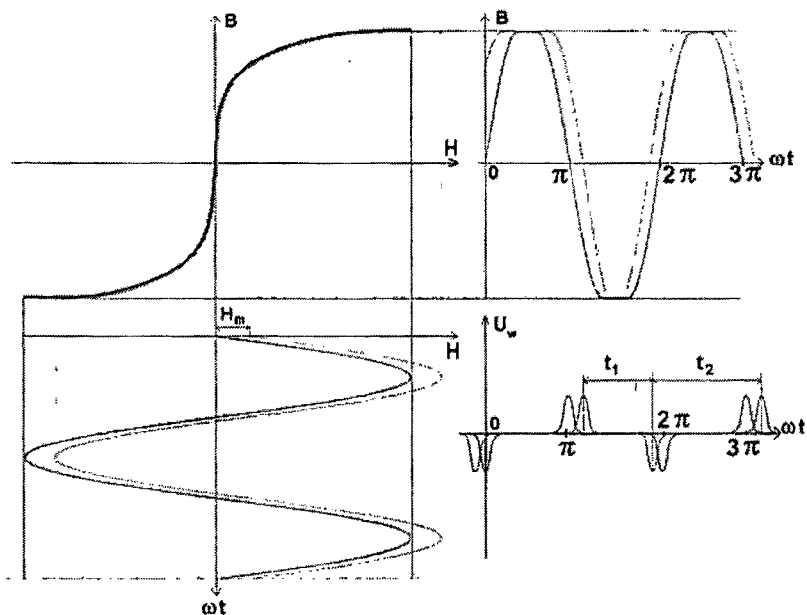
gdzie:  $k$  – stała zależna między innymi od współczynnika sprzężenia magnetycznego,  $z$  – liczba zwojów cewki, zaś  $s$  – pole przekroju cewki.

Na rysunku 3 przedstawiono graficznie zależności pola magnesującego  $H$ , indukcji magnetycznej w rdzeniu  $B$  oraz napięcia  $u_w$  na uzwojeniu pomiarowym [4].

Jeżeli zewnętrznego pola mierzone  $H_m$  jest równe zero, impulsy napięcia  $u_w$  na uzwojeniu pomiarowym są rozłożone symetrycznie na osi czasu  $t$ . W rezultacie w napięciu  $u_w(t)$  nie ma parzystych harmonicznnych. Jak widać z rysunku 3 obecność pola mierzonego  $H_m$  zakłóca tę symetrię. W przebiegu napięcia  $u_w$  pojawiają się parzyste harmoniczne, których amplitudy mogą być miarą natężenia pola mierzonego  $H_m$  (a ściślej jego składowej działającej w osi przetwornika transduktorowego) [4]. Także stosunek  $t_2$  do  $t_1$  zależy od natężenia zewnętrznego pola mierzonego  $H_m$ , co umożliwiło konstrukcję w pełni cyfrowych układów do analizy sygnału z przetworników transduktorowych [2] (tzw. przetwarzanie „flux-set”).

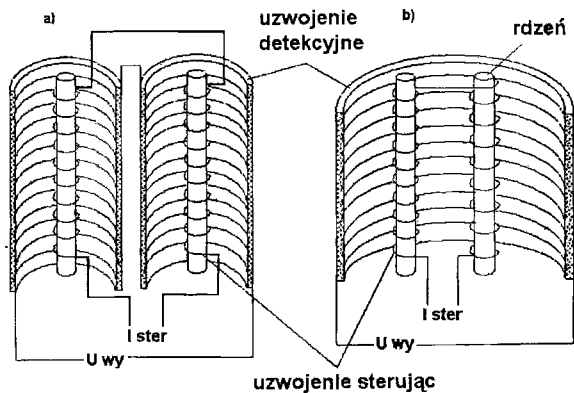
W rozwiązaniach analogowych lub analogowo-cyfrowych sygnałem wyjściowym przetwornika transduktorowego jest zwykle amplituda drugiej harmonicznnej. Jednak ze względu na dużą zawartość nieparzystych harmonicznnych przetworniki jednorodzeniowe są rzadko stosowane w praktyce. Użycie ich powoduje konieczność stosowania filtrów

o dużej dobroci, co utrudnia konstrukcją współpracujących z nim układów elektronicznych [4].



Rys. 3. Graficzne przedstawienie zależności pola magnesującego  $H$ , indukcji magnetycznej w rdzeniu  $B$  oraz napięcia  $u_w$  na uzwojeniu pomiarowym przetwornika jednorodzeniowego [4]

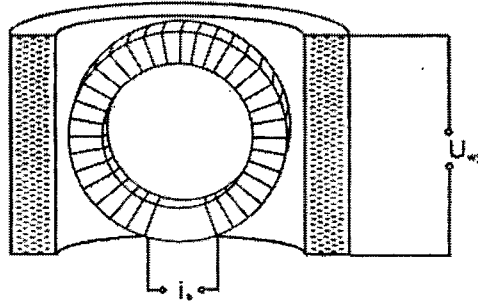
Z tego względu przetworniki transduktorowe składają się zazwyczaj z dwóch rdzeni, na których nawinięte są identyczne uzwojenia magnesujące. Dwa najczęściej stosowane układy pracy przetworników dwurdzeniowych to układ Foerстера i układ Vacquiera [6] przedstawione na rysunku 4.



Rys. 4. Schematy układów pracy przetworników transduktorowych dwurdzeniowych:

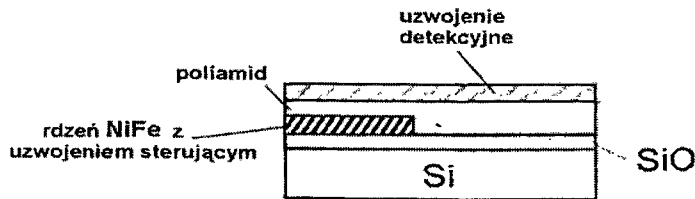
a) Förstera, b) Vacquiera

Istnieją jeszcze inne konstrukcje przetworników transduktorowych. Coraz częściej stosowane są także sondy z rdzeniem pierścieniowym. Działają one podobnie jak przetworniki dwurdzeniowe w układzie Vacquiera [7].



Rys. 5. Schemat przetwornika transduktorowego z rdzeniem pierścieniowym

W ostatnich latach pojawiają się także miniaturowe konstrukcje przetworników transduktorowych wykonane w technologii planarnej. Jednak ograniczeniem ich zastosowania jest znaczny wzrost szumów wynikający ze zmniejszenia się długości rdzenia ferromagnetycznego. W przetwornikach wykonanych w technologii planarnej uzwojenie nie otacza rdzenia (tak jak w klasycznych przetwornikach transduktorowych) lecz jest ono wykonywane na powierzchni rdzenia. W takim rozwiązaniu płytkę krzemową pokrywa się cienką warstwą permalloyu i metodą fotolitografii wykonuje się uzwojenie sterujące. Natomiast uzwojenie sterujące wykonuje się w warstwie aluminium [8].



Rys. 6. Schemat budowy przetwornika transduktorowego wykonanego w technologii planarnej [8]

Główną zaletą miniaturowych przetworników transduktorowych wykonanych w technologii planarnej jest możliwość pomiaru zmiennego pola magnetycznego o częstotliwości powyżej 1kHz, gdyż na ich uzwojenie sterujące można podawać przebiegi prądowe o częstotliwości do 100kHz. Istotną zaletą jest także znaczna odporność na przeciążenia

i wstrząsy mechaniczne, o wiele większa niż klasycznych przetworników transduktorowych [8].

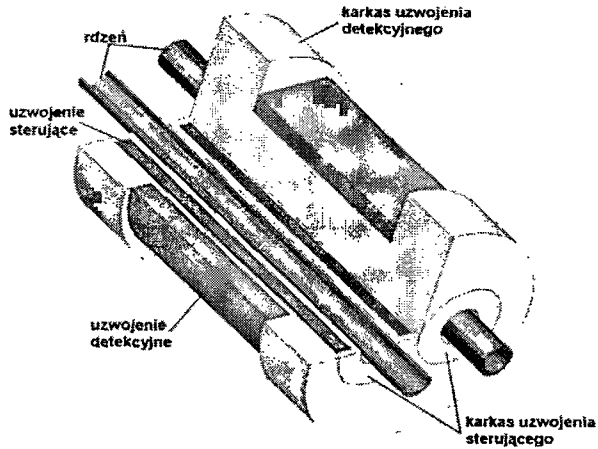
### 3. OPRACOWANY PRZETWORNIK TRANSDUKTOROWY

Parametry funkcjonalne przetwornika transduktorowego, obejmujące przede wszystkim czułość i powtarzalność wskazań, zależą w głównej mierze od właściwości materiału, z którego został wykonany rdzeń. Ponieważ dla rdzeni przetworników tego typu najważniejszym parametrem jest wysoka wartość przenikalności magnetycznej wydaje się, że dobrym materiałem na ich rdzenie mogą być taśmy z magnetyków o strukturze amorficznej, uzyskiwane na drodze szybkiego schładzania.

Jednak materiały amorficzne produkuje się w postaci taśmy o grubości do około  $40\mu\text{m}$ , natomiast w przetworniku transduktorowym w układzie Vacquiera potrzebny jest rdzeń o kształcie walca. Są, co prawda produkowane w niewielkich ilościach na potrzeby laboratoryjne lite materiały o strukturze amorficznej, lecz nie mają one dostatecznie wysokiej przenikalności magnetycznej, by można je było zastosować w konstrukcji przetworników transduktorowych.

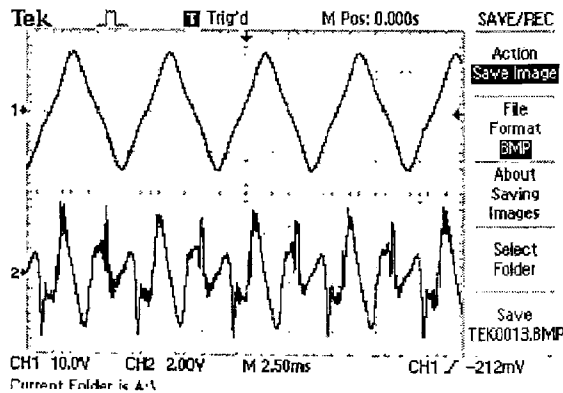
Dlatego na potrzeby budowy przetworników transduktorowych opracowano nową metodę wytwarzania rdzeni. Pasek taśmy z materiału o strukturze amorficznej o wymiarach  $70 \times 105 \times 0,04$  mm został nawinięty na walec o średnicy 4mm, dzięki czemu powstał rdzeń o 7,5 warstwach. Tworząca walca była zgodna z kierunkiem odlewania taśmy, dzięki czemu anizotropia materiału wpłynęła korzystnie na wzrost jego przenikalności magnetycznej. Następnie rdzeń został wyżarzony w temperaturze  $350^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$  przez 60 minut, co zarówno utrwaliło jego kształt, jak i przyczyniło się do wzrostu przenikalności magnetycznych (poprzez minimalizację poziomu naprężeń własnych rdzenia).

Na rysunku 7 przedstawiono budowę opracowanego przetwornika transduktorowego.



Rys. 7. Opracowany przetwornik transduktorowy w przekroju

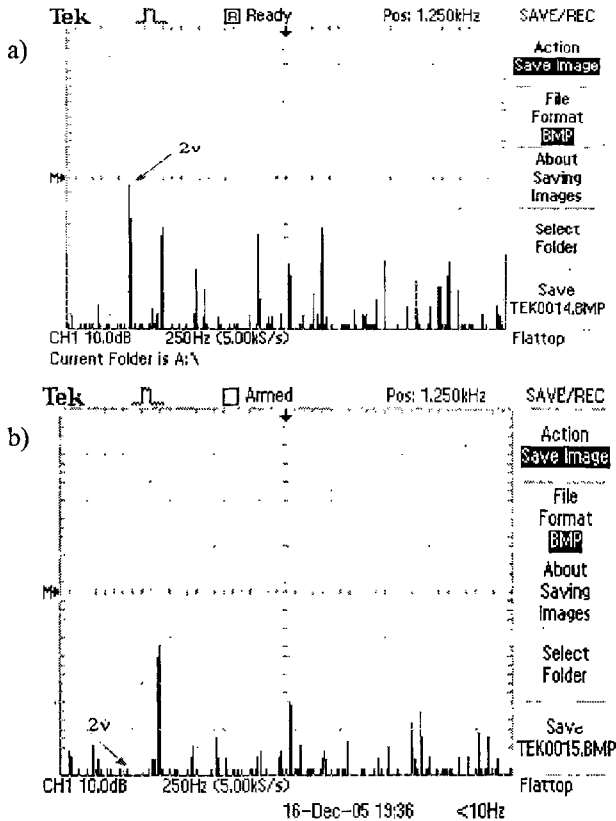
Podając prądowy przebieg sinusoidalny na uzwojenia sterujące przetwornika uzyskujemy na uzwojeniu detekcyjnym sygnał silnie odkształcony (rysunek 7). Wynika to z faktu, że uzwojenia wytwarzające pola magnetyczne podłączone są w kierunkach przeciwnych, a w rezultacie nieparzyste harmoniczne sygnału z rdzeni wzajemnie się znośzą. Natomiast uzyskany sygnał to składowa parzystych harmonicznych, z których druga harmoniczna jest sygnałem użytecznym z przetwornika.



Rys. 8. Obraz oscyloskopowy: kanał 1 – sygnał na uzwojeniu sterującym, kanał 2 – sygnał na uzwojeniu detekcyjnym

W dwurdzeniowym przetworniku transduktorowym ważne jest by rdzenie miały jak najbardziej zbliżone do siebie parametry, co umożliwi kompensację nieparzystych harmonicznych w sygnale wyjściowym z przetwornika. Umożliwia to zastosowanie filtrów o mniejszej selektywności, poprawia powtarzalność wskazań przetwornika.

Dlatego też wykonano jednocześnie serię kilku rdzeni, z których wybrano parę o zbliżonych parametrach.



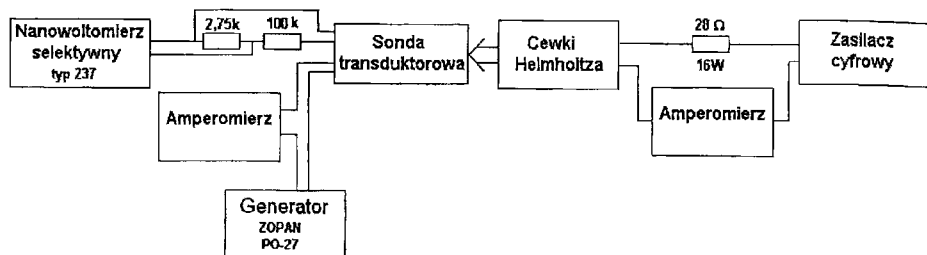
Rys. 8. Widmo częstotliwościowe sygnału detekcyjnego dla pola a)  $40\mu\text{T}$ , b)  $0\mu\text{T}$

Na rysunku 8 przedstawiono widma częstotliwościowe sygnałów wyjściowych z przetwornika dla pola mierzonego o wartości 0 i  $40\mu\text{T}$ . Na rysunku tym można zaobserwować, że druga harmoniczna (a więc harmoniczna użytkowa) zaczyna dominować w sygnale wyjściowym z opracowanego przetwornika, co upraszcza budowę układu przetwarzania sygnału pomiarowego.

Na rysunku 9 podano schemat blokowy stanowiska pomiarowego zastosowanego do wzorcowania opracowanego przetwornika transduktorowego. Uzwojenie sterujące przetwornika zostało podłączone do generatora prądu sinusoidalnie zmiennego o częstotliwości  $182,3\text{Hz}$  i wartości skutecznej  $81,3\text{mA}$ . Natomiast uzwojenie detekcyjne podłączono do nanowoltomierza selektywnego typu 237 poprzez dzielnik napięcia. Wzorcowania przetwornika, dokonano w cewkach Helmholtza, wytwarzających jednorodne, stałe pole magnetyczne. Natężenie pola magnetycznego zmieniano regulując prąd w

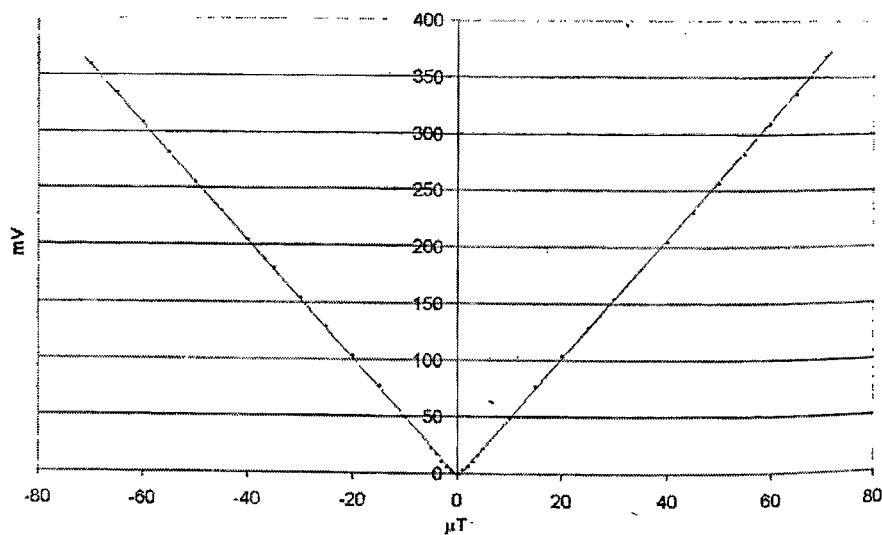


cewkach Helmholtza. Jednocześnie dla wyeliminowania wpływu pola ziemskiego ustawiono oś przetwornika prostopadle do wektora pola ziemskiego.



Rys. 10. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego zastosowanego do wzorcowania opracowanego przetwornika transduktorowego

Tak wykonanym układem zbadano wybrane właściwości metrologiczne opracowanego przetwornika w zakresie pola mierzonego od  $-70\mu\text{T}$  do  $+70\mu\text{T}$ , przy różnych częstotliwościach i wartościach prądu sterującego.



Rys. 10. Charakterystyka przetwarzania przetwornika w zakresie  $-70\mu\text{T} + 70\mu\text{T}$

Na rysunku 10 podano charakterystykę przetwarzania opracowanego przetwornika. Błąd powtarzalności wskazań urządzenia po uwzględnieniu błędu odtwarzania indukcji magnetycznej, został oszacowany na  $0,5\mu\text{T}$ .

#### 4. WNIOSKI

Opracowana metoda wytwarzania rdzeni walcowych z magnetyków o strukturze amorficznej stwarza możliwość budowy nowego typu przetworników transduktorowych pracujących w układzie Vacquiera. Przetworniki te cechują się znaczną czułością i powtarzalnością wskazań, co stwarza możliwości ich praktycznego zastosowania w zakresie magnetometrów stosowanych w badaniach geodezyjnych i geologicznych jak również w nieniszczących badaniach metalowych elementów konstrukcyjnych.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Ripka: Review of fluxgate sensors; *Sensors and Actuators A*, 33 (1992) p.129.
- [2] G. Vertesy, A. Gasparics, A. Suvegás: 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] S. Tumański: Thin Film Magneto-resistive Sensors, IOP 2001.
- [4] M. Natęcz, J. Jaworski: Miernictwo magnetyczne, WNT 1968.
- [5] M. J. Sablik, D. C. Jiles: Coupled magnetoelastic theory of magnetic and magnetostrictive hysteresis, *Trans. Magn.* 29 (1993) p. 2113.
- [6] W. Bornhoeft, G. Trenkler: Magnetic Field Sensors: Fluxgate sensors; *Sensors*, edited by W. Goepel et al., Vol. 5, pp. 154-203, VCH, Weinheim, 1989.
- [7] Gordon D. I.: Recent advances in fluxgate magnetometry, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. Mag-8, No. 1, March 1972, s. 76-82.
- [8] Seitz T. "Fluxgate sensors in Planar Microtechnology" *Sensors and Actuators*, A21-A23 1990.