

Roman SZEWCZYK

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

Warszawa

Adam BIENKOWSKI

Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych

Politechnika Warszawska

MOŻLIWOŚCI ZMNIEJSZENIA NIEPEWNOŚCI WSKAZAŃ MAGNETOMETRU TRANSDUKTOROWEGO METODĄ PROGRAMOWĄ

Streszczenie. W referacie przedstawiono rozwiązania stosowane w konstrukcji magnetometrów transduktorowych przeznaczonych do pomiaru i wykrywania anomalii słabych pól magnetycznych. Opisano konstrukcję elektryczną magnetometru, w którym zastosowano zarówno układy cyfrowe, jak i analogowe. Omówiono szczegółowo algorytm pozwalający na programowe zmniejszenie niepewności wskazań magnetometru. Przedstawione w referacie rozwiązania techniczne zastosowano w konstrukcji magnetometru transduktorowego FG-15, co pozwoliło na praktyczną weryfikację ich skuteczności.

POSSIBILITIES OF DECREASING UNCERTAINTY OF FLUX GATE MAGNETOMETER BY PROGRAMMED METHODS

Summary. This paper presents solutions used in construction of fluxgate magnetometers for measurement and detection of anomaly weak magnetic fields. The construction of magnetometer which utilizes both analog and digital electronic circuits is described. The algorithm used for programmed decreasing the uncertainty of indications of magnetometer is presented. The efficiency of the described technical solutions was practically verified basing on construction of a FG-15 magnetometer.

1. WSTĘP

Zastosowanie przetworników transduktorowych (ang. fluxgate) pozwala na pomiar stałych, słabych pól magnetycznych rzędu $100 \mu\text{T}$. Ze względu na niski poziom szumów przetwornika transduktorowego magnetometri tego typu umożliwiają uzyskanie rozdzielczości pomiarowej 10 pT przy błędzie dokładności wskazań wynoszącym około 1% [1].

Magnetometri transduktorowe pozwalają na pomiar nie tylko wartości natężenia pola magnetycznego, lecz także i jego kierunku. Jest to ich istotna zaleta w stosunku do magnetometrów wykorzystujących zjawisko rezonansu magnetycznego (NMR), które umożliwiają jedynie skalarny pomiar natężenia pola magnetycznego [2].

Do wad przetworników transduktorowych należy zaliczyć ich wrażliwość na obciążenia mechaniczne oraz konieczność stosowania skomplikowanego układu elektronicznego, zwłaszcza przy pomiarach z dużą rozdzielczością.

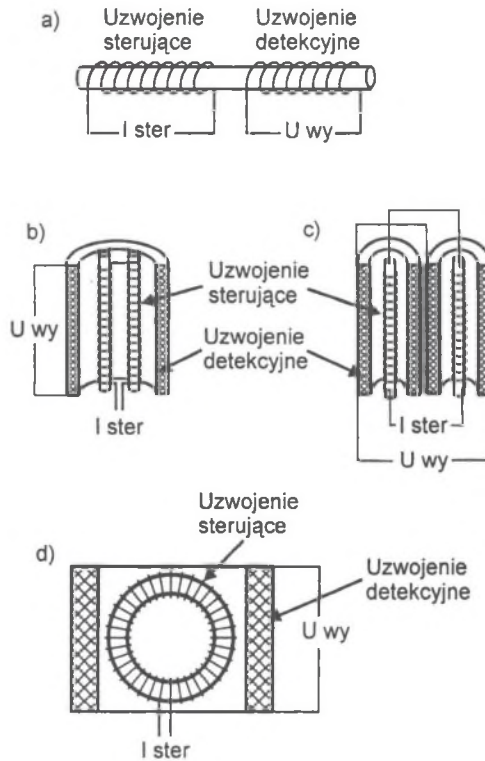
Ze względu na wysoką czułość i rozdzielczość pomiarową oraz możliwość pomiaru wektorowego magnetometri transduktorowe znajdują przede wszystkim zastosowanie przy wykrywaniu anomalii pola magnetycznego w badaniach geologicznych, archeologicznych i geodezyjnych. Umożliwiają także wykrywanie dużych, metalowych obiektów, na przykład łodzi podwodnych. Mogą być również używane w badaniach nieniszczących elementów stalowych.

W większości tych zastosowań magnetometr używany jest częściej do wykrywania zaburzeń pola magnetycznego niż do pomiaru jego bezwzględnej wartości. Z tego względu w konstrukcji tego typu przyrządu główny nacisk musi być położony na uzyskanie jak najlepszej powtarzalności wskazań.

2. PODSTAWOWE ZASADY PRACY PRZETWORNIKÓW TRANSDUKTOROWYCH

Zasada pracy przetworników transduktorowych opiera się na wykorzystaniu symetrii i nieliniowości krzywej magnesowania rdzenia z materiału magnetycznie miękkiego. Jako rdzenie tych przetworników najczęściej stosowane są materiały magnetycznie miękkie o dużej przenikalności początkowej, takie jak permalloy [4] lub stopy amorficzne [3].

Podstawowe rozwiązania stosowane w budowie przetworników transduktorowych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Najczęściej stosowane rozwiązania konstrukcji przetworników transduktorowych [5]:
 a) jednordzeniowy b) w układzie Vacquiera c) w układzie Förstera
 d) z rdzeniem toroidalnym

Fig. 1. Basic fluxgate sensor configurations [5]: a) single core b) Vacquier c) Förster
 d) ring core

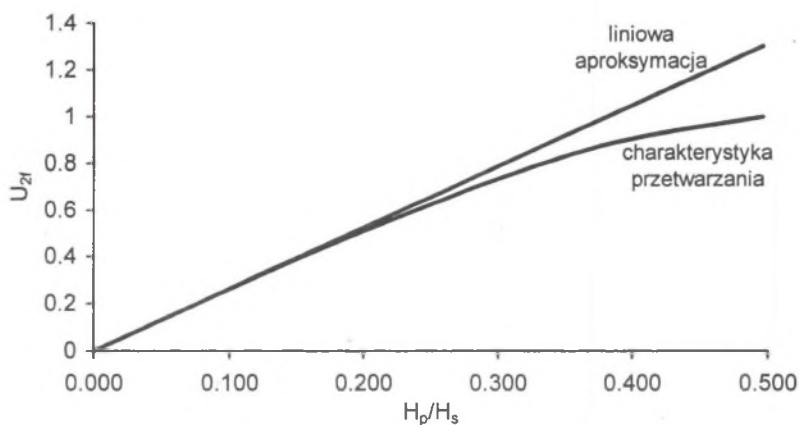
Układ elektryczny przetwornika transduktorowego obejmuje uzwojenie detekcyjne oraz jedno lub dwa uzwojenia sterujące nawinięte na rdzeniu z materiału magnetycznie miękkiego [4].

Na uzwojenie sterujące podawany jest sinusoidalny przebieg prądowy o częstotliwości akustycznej. Amplituda tego przebiegu jest na tyle duża, że rdzeń przez znaczną część okresu jest w stanie nasycenia magnetycznego (uzyskiwanego przy natężeniu pola magnetycznego H_s). W wyniku asymetrii zmian strumienia magnetycznego w rdzeniu, powodowanej przez mierzone, stałe pole magnetyczne H_p , w rozkładzie widmowym przebiegu napięciowego indukowanego na uzwojeniu pomiarowym pojawiają się parzyste harmoniczne. Ich amplituda jest, w pewnym zakresie, w przybliżeniu proporcjonalna do natężenia mierzonego pola H_p . Na rys. 2 przedstawiono unormowaną zależność amplitudy drugiej harmonicznej U_{2f} w

sygnale wyjściowym przetwornika transduktorowego w funkcji H_p/H_s . Przedstawione zależności uzyskano w wyniku symulacji komputerowej dla przetwornika jednordzeniowego (rys. 1a). Do symulacji zastosowano trójdcinkową aproksymację krzywej magnesowania materiału rdzenia [4] daną równaniem (1).

$$B(H) = \begin{cases} B_s & ; H > H_s \\ \mu_0 \mu H & ; -H_s < H < H_s \\ -B_s & ; H < -H_s \end{cases} \quad (1)$$

Z rys. 2 wynika, że dla małych wartości pól mierzonych przetwornik transduktorowy ma charakterystykę przetwarzania zbliżoną do liniowej. Jednakże ze wzrostem wartości natężenia mierzonego pola magnetycznego konieczna jest korekta nieliniowości charakterystyki przetwornika.



Rys. 2. Unormowana charakterystyka przetwarzania przetwornika transduktorowego (a) i jej liniowa aproksymacja (b)

Fig. 2. Normalized characteristic of flux gate sensor (a) and its linear approximation (b)

Przetwornik jednordzeniowy (rys. 1a) jest prosty w konstrukcji, lecz uzyskiwany na jego uzwojeniu detekcyjnym sygnał zawiera nieparzyste harmoniczne. Powoduje to konieczność użycia rozbudowanego układu elektronicznego do analizy sygnału z przetwornika.

Przetworniki dwurdzeniowe w układzie Förstera (rys. 1c) charakteryzują się dwa razy wyższą czułością niż przetworniki jednordzeniowe [5], jednak ze względu na podwójne uzwojenie detekcyjne wymagają znacznej średnicy sondy pomiarowej. Przetwornik

transduktorowy w układzie Vacquiera (rys. 1b) można łatwiej miniaturyzować, jednak ze względu na znaczną odległość uzwojenia detekcyjnego od rdzenia przetwornik tego typu ma niższą czułość niż przetwornik w układzie Förstera.

Przetworniki z rdzeniami toroidalnymi (rys. 1d) są bardziej odporne na działanie naprężeń mechanicznych [6] niż przetworniki z rdzeniami o otwartym magnetowodzie. Ponadto cechują się one dużą czułością. Pewne trudności może jednak sprawić wykonanie uzwojenia sterującego na rdzeniu toroidalnym, jeżeli wymagana jest duża liczba zwojów.

W sygnale wyjściowym z przetworników dwurdzeniowych oraz z rdzeniem toroidalnym zawartość nieparzystych harmonicznych jest niewielka, co upraszcza konstrukcję współpracującego z przetwornikiem elektronicznego układu pomiarowego. Ponadto nie zachodzi konieczność stosowania filtrów o dużej selektywności, co poprawia powtarzalność wskazań przyrządu.

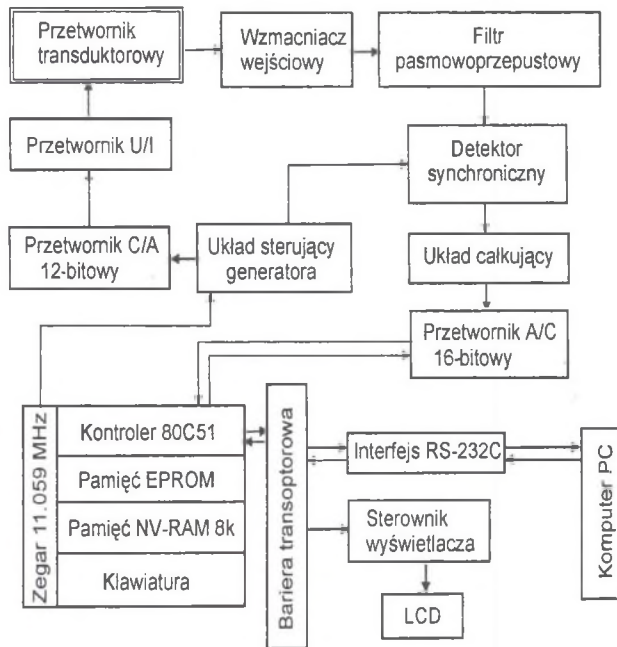
3. BUDOWA MAGNETOMETRU TRANSDUKTOROWEGO FG-15

W konstrukcji magnetometru transduktorowego FG-15 zastosowano zarówno układy cyfrowe, jak i analogowe. Pozwoliło to na istotne obniżenie kosztów konstrukcji przy zachowaniu możliwości cyfrowego przetwarzania sygnału uzyskiwanego z przetwornika transduktorowego oraz możliwości wprowadzania poprawek addytywnych linearyzujących charakterystykę przetwarzania przetwornika [8]. Schemat blokowy magnetometru transduktorowego FG-15 przedstawiono na rys. 3.

Napięciowy sygnał sinusoidalny wytwarzany jest w precyzyjnym przetworniku cyfrowo-analogowym, a następnie zamieniany na sygnał prądowy, który steruje przetwornikiem transduktorowym. Sygnał z uzwojenia detekcyjnego przetwornika transduktorowego w układzie Vacquiera jest wzmacniany, a następnie w filtrze analogowym zostaje wyodrębniona z niego druga harmoniczna. Sygnał wyjściowy z filtru jest podany na detektor synchroniczny, gdzie zostaje określona jego faza, co pozwala na określenie zwrotu mierzonego pola. Przebieg sterujący pracą detektora synchronicznego podawany jest z układu sterującego generatorem.

Po określeniu fazy w detektorze synchronicznym sygnał z przetwornika transduktorowego jest całkowany w integratorze, a następnie próbkowany za pomocą 16-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego.

Magnetometr transduktorowy FG-15 zawiera mikrokontroler 80C51 wraz z pamięcią EPROM i NV-RAM, do której zostały wprowadzone poprawki addytywne linearyzujące charakterystykę przetwarzania przetwornika transduktorowego. Mikrokontroler umożliwia swobodne wprowadzanie poprawek addytywnych, filtrację cyfrową sygnału pomiarowego oraz steruje wyświetlaczem ciekłokrystalicznym i prostą klawiaturą.



Rys. 3. Schemat blokowy magnetometri transduktorowego FG-15
 Fig. 3. Schematic block diagram of FG-15 flux gate magnetometer

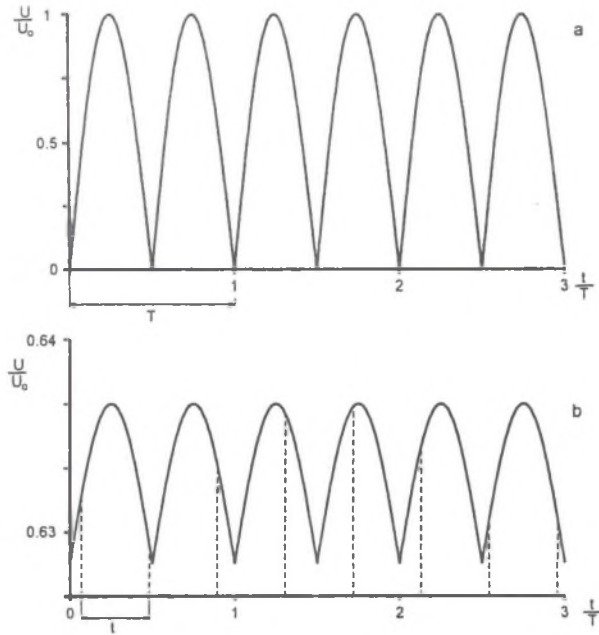
Magnetometr transduktorowy FG-15 został wyposażony w interfejs RS-232C, który umożliwia przekazanie wyników pomiarów pola magnetycznego do komputera personalnego w celu dalszego przetwarzania lub archiwizacji. Aby uniknąć przenoszenia się zakłóceń generowanych przez komputer do toru pomiarowego magnetometru, zastosowano sprzężenie optoelektroniczne, zapewniające separację galwaniczną. Oddziela ona także zawierający przetwornicę napięcia moduł sterujący wyświetlacza ciekłokrystalicznego. Rozwiązanie to, stosowane zazwyczaj w woltomierzach cyfrowych o wysokiej rozdzielczości wskazań, pozwoliło w sposób wyraźny podwyższyć powtarzalność pomiaru realizowanego przez przetwornik analogowo-cyfrowy.

4. ZASTOSOWANY ALGORYTM PROGRAMOWEJ KOREKЦИИ WSKAZAŃ PRZYRZĄDU

Oprócz omówionych rozwiązań sprzętowych w magnetometrze zastosowano algorytm cyfrowej korekcji wskazań.

Po detekcji synchronicznej sygnał pomiarowy, którego wartość średnia jest proporcjonalna do natężenia mierzonego pola magnetycznego stałego H_p , ma kształt

przebiegu sinusoidalnego wyprostowanego dwupołówkowo (rysunek 4a). Uzyskano to odpowiednio dobierając przesunięcie fazowe przebiegu sterującego przetwornikiem transduktorowym i detektorem synchronicznym.



Rys. 4. Unormowane przebiegi napięcia na wyjściu detektora synchronicznego (a) i na wyjściu integratora (b). Liniami przerywanymi oznaczono chwile próbkowania sygnału

Fig. 4. Normalized curves of voltage variation at the outputs of the synchronous detector (a) and of the integrator (b). Moments of sampling are marked with dotted lines

W celu pomiaru wartości średniej sygnał z detektora synchronicznego jest podawany na integrator. Jednakże na wyjściu integratora obserwowane są tętnienia. Można je zmniejszyć przez zwiększenie stałej czasowej integracji, powoduje to jednak zwiększenie stałej czasowej (bezwładności) wskazań przyrządu. Stwarza to istotne problemy przy wykrywaniu krótkotrwałych anomalii pola magnetycznego.

W celu uniknięcia tych problemów w magnetometrze transduktorowym FG-15 zastosowano inteligentne cyfrowe uśrednianie wartości mierzonej przez przetwornik analogowo-cyfrowy. Ponieważ zarówno okres sygnału z generatora sterującego przetwornikiem transduktorowym, jak i okres próbkowania przetwornika analogowo-cyfrowego są wyznaczone na podstawie tego samego wzorca częstotliwości (generator

kwarcowy mikroprocesora, rys. 3), istnieje możliwość synchronizacji próbkowania sygnału pomiarowego z generatorem sterującym przetwornikiem transduktorowym. Jeżeli okres sygnału z generatora sterującego wynosi T , a uśrednienie chcemy przeprowadzić z m próbek pobranych w czasie n okresów, to okres próbkowania można wyznaczyć na podstawie równania (2):

$$t = \frac{n}{m+1} T. \quad (2)$$

W przypadku takiego doboru okresu próbkowania na wynik pomiaru nie będzie miał wpływu brak synchronizacji chwili rozpoczęcia cyklu próbkowania z okresem sygnału generatora sterującego. Przy zastosowaniu takiej metody uśredniania wyniku pomiaru należy stosować przetworniki analogowo-cyfrowe z układem próbkująco-pamiętającym, zaś okres próbkowania t musi być większy od minimalnego okresu próbkowania, który może być realizowany przez dany przetwornik.

Algorytm inteligentnego cyfrowego uśredniania wyniku pomiaru w magnetometrze transduktorowym FG-15 może być realizowany w oparciu o 16, 256 lub 4096 próbek, przy czym użytkownik ma możliwość wyboru liczby próbek. Pozwala to na uzyskanie skutecznego kompromisu między stałą czasową przyrządu pomiarowego a eliminacją przypadkowych zakłóceń pochodzących z innych źródeł niż tętnienia na wyjściu integratora.

5. UZYSKANE WYNIKI

Po wprowadzeniu poprawek addytywnych linearyzujących charakterystykę przetwarzania przetwornika transduktorowego oraz uśrednieniu sygnału z 256 próbek, według algorytmu opisanego powyżej, magnetometr FG-15 uzyskał następujące parametry metrologiczne:

Zakres pomiarowy:	$\pm 75 \mu\text{T}$
Rozdzielczość wskazań:	$0,01 \mu\text{T}$
Dokładność wskazań:	$0,5 \mu\text{T}$
Niepewność standardowa wskazań:	$0,02 \mu\text{T}$

Podana niepewność standardowa wskazań została wyznaczona na podstawie serii pomiarów zrealizowanych w czasie 0,5 godziny, więc uwzględnia dryft długoterminowy wskazań magnetometru [8,9], bardzo istotny przy wykrywaniu anomalii pola magnetycznego. Przy serii pomiarów realizowanych w krótkim czasie (około 10s) błąd powtarzalności wskazań przyrządu był mniejszy od jego rozdzielczości.

W przypadku pomiarów realizowanych bez wprowadzenia cyfrowej korekcji wskazań wartość błędu powtarzalności wskazań rosła około 8 razy.

6. WNIOSKI

1) Zastosowanie połączenia elektroniki cyfrowej i analogowej pozwoliło zminimalizować błędy powtarzalności wskazań wprowadzane przez generator sterujący przetwornikiem i tor pomiarowy magnetometru.

2) Bariera transoptorowa separująca galwanicznie interface RS-232 oraz wyświetlacz ciekłokrystaliczny od toru pomiarowego magnetometru chroni przyrząd przed zakłóceniami wysokiej częstotliwości generowanymi przez komputer PC i przetwornicę DC/DC zasilającą wyświetlacz LCD.

3) Opisany algorytm uśredniania wyników pomiarów pozwala na znaczną (około 8 razy) poprawę powtarzalności wskazań magnetometru

Autorzy serdecznie dziękują Pani dr inż. Annie Lewińskiej-Romickiej za zyczliwą pomoc w trakcie prac nad konstrukcją magnetometru FG-15.

LITERATURA

1. Gordon D. I.: Recent advances in fluxgate magnetometry. IEEE Trans. on Magnetics, Vol. Mag-8, No. 1, March 1972, p. 76-82.
2. Lenz J. E.: A Review of magnetic sensors. Proc. of the IEEE, Vol. 78, No. 6, June 1990, p. 973-989.
3. Moldovanu A., Chirac H., Macovicus M., Diaconu E., Ioan C., Moldovanu E., Tomut M.: Functional study of fluxgate sensors with a amorphous magnetic materials cores. Sensors and Actuators A.59, 1997, p. 105-108.
4. Nałęcz M., Jaworski J.: Miernictwo magnetyczne. WNT, Warszawa 1968.
5. Primdahl F.: The fluxgate mechanism. IEEE Trans. on Magnetics, Vol. Mag-6, No. 2, June 1970, p. 376-386.
6. Rivka P.: Review of fluxgate sensors. Sensors and Actuators, A.33, 1992, s. 129-141.
7. Szewczyk R.: Digitally controlled fluxgate sensor for measurement the weak magnetic fields. Proc. Int. Conf. „Mechatronics 2000” 21-23. 09. 2000, Warszawa, p. 435-438.
8. Szewczyk R.: Sterowany Komputerowo Magnetometr Transduktorowy. VI Krajowe Sympozjum Pomiarów Magnetycznych 18-20.10.2000, Kielce, s. 334-341.
9. Wyrażanie niepewności pomiaru - przewodnik. Główny Urząd Miar, Warszawa 1995.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Brunon Szadkowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 1 grudnia 2001

Abstract

This paper describes basic principles of construction of a fluxgate magnetometer and advantages of using digital electronic in such construction. The method of decreasing uncertainty of indication is presented and discussed.

Chapter 2 presents the theory of operation of single, two and ring core fluxgate sensors. The results of computer simulation of sensitivity characteristic of the fluxgate sensor are also presented.

Chapter 3 shows construction of FG-15 magnetometer. The advantages of using both digital and electronic circuits in the construction are discussed.

Chapter 4 focuses on programming algorithm used for decreasing the uncertainty of indications. The equation for calculation of a sampling frequency is also presented and discussed.

The summary of the work one can find in chapters 5 and 6.

In conclusion there is stated that due to using the described programming algorithm the uncertainty decreases about 8 times.