

Stanisław MOSKOWICZ

POLITECHNIKA SZCZECIŃSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ, ZAKŁAD METROLOGII

**Transduktorowe czujniki pola magnetycznego
– przegląd rozwiązań i prace własne**

Dr inż. Stanisław MOSKOWICZ

Adiunkt w Zakładzie Metrologii Instytutu Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej. Absolwent Wydziału Elektrycznego PS w 1975 r. Doktorat – PS, 1984 r.. Zajmuje się pomiarami wielkości nieelektrycznych, stykowymi i bezstykowymi przetwornikami do pomiarów prądów i napięć, stałych i zmiennych oraz transduktorowymi czujnikami pola magnetycznego. Autor około 70 prac naukowych.



e-mail: smoskow@ps.pl

Streszczenie

Transduktorowe czujniki pola magnetycznego wykorzystuje się do pomiarów słabych stałych i wolnozmiennych pól magnetycznych od lat dwudziestych XX wieku. W ich ponad osiemdziesięcioletniej historii opracowano i opracowuje się nadal wiele różnych konstrukcji czujników. W artykule, w oparciu o literaturę i badania własne, przedstawiono przegląd stosowanych rozwiązań oraz współczesne konstrukcje czujników.

Słowa kluczowe: czujnik transduktorowy, pole magnetyczne.

**Magnetic field fluxgate-based sensors
– survey of solutions and own works****Abstract**

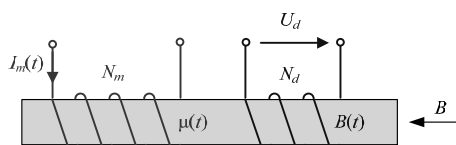
Magnetic field fluxgate-based sensors have been used to measure weak, constant and slowly varying magnetic fields since the 1920s. Many different constructions of these sensors have been worked out up to now. Basing on the literature and the research work performed by the author, the paper presents a survey of the employed solutions and modern constructions of the sensors.

Keywords: fluxgate, magnetic field sensors.

1. Wstęp

Pierwsze konstrukcje czujników transduktorowych pojawiły się w latach dwudziestych ubiegłego wieku [1-5]. Od tego czasu, mimo pojawienia się nowych rodzajów czujników pola magnetycznego, następuje ich dalszy rozwój związany głównie z nowymi materiałami magnetycznymi i technologiami wykonywania [6-10].

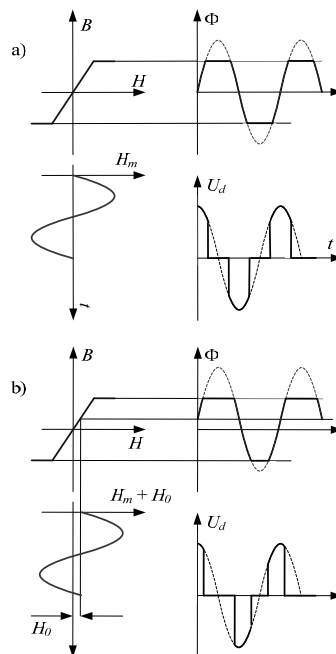
Budowę czujnika, w najprostszej wersji ilustrującej zasadę działania, przedstawiono na rys. 1. Na rdzeniu wykonanym z miękkiego materiału magnetycznego nawija się dwa uzwojenia: magnesujące N_m i detekcyjne N_d . Działanie czujnika opiera się o cykliczne wprowadzanie rdzenia w stan nasycenia za pomocą prądu magnesującego I_m (najczęściej sinusoidalnego) przepływającego przez uzwojenie magnesujące N_m .



Rys. 1. Czujnik transduktorowy
Fig. 1. Fluxgate sensor

Zmiany przenikalności magnetycznej rdzenia powodują modulowanie strumienia magnetycznego pochodzącego od mierzonego pola o indukcji B . Zmieniający się strumień magnetyczny wytwarza w uzwojeniu detekcyjnym N_d napięcie U_d zawierające drugą i wyższe harmoniczne częstotliwości magnesowania. Zasadę

działania czujników ilustruje rys. 2. Krzywą magnesowania rdzenia aproksymowano trzema odcinkami linii prostej.



Rys. 2. Ilustracja działania czujników transduktorowych: a) dla $H=0$; b) dla $H=H_0$
Fig. 2. Principle of the fluxgate sensor operation: a) for $H=0$; b) for $H=H_0$

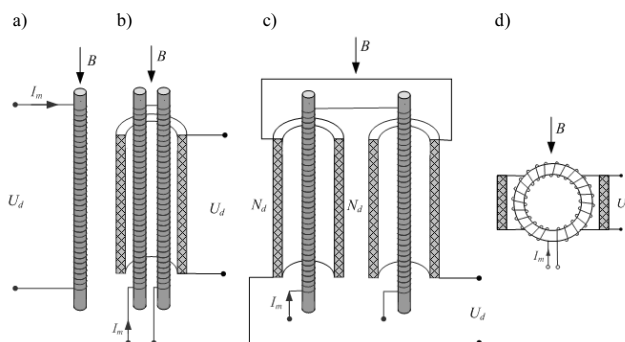
Działanie czujników transduktorowych przedstawiono na przykładzie czujnika jednorodzeniowego. Dla innych czujników zasada działania jest zbliżona. W realnych czujnikach następuje znacznie głębsze nasycenie rdzenia czujnika prądem magnesującym niż to pokazano na rys. 2.

2. Rodzaje czujników transduktorowych

Istnieje wiele rodzajów czujników transduktorowych różniących się zasadą działania, rodzajem i liczbą zastosowanych rdzeni oraz układami pracy.

Jednym z kryteriów podziału czujników są kierunki pola magnesującego i badanego. Rozróżnia się czujniki o polach równoległych i prostopadłych.

Czujniki o polach równoległych przedstawiono na rys. 3 [1-4].



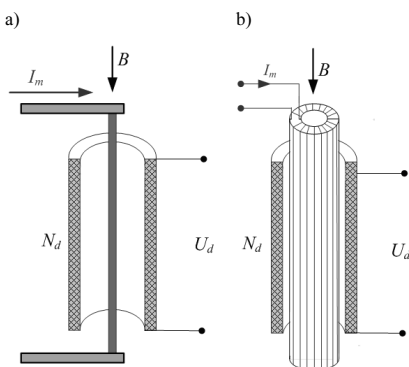
Rys. 3. Czujniki transduktorowe o polach równoległych: a) jednorodzeniowy; b) dwurodzeniowy Vacquiera; c) dwurodzeniowy Förstera; d) z rdzeniem toroidalnym Aschenbrennera i Goubau
Fig. 3. Parallel type fluxgates a) single-rod; b) double-rod sensor of Vacquier type; c) double-rod sensor of Förster type; d) ring-core sensor of Aschenbrenner and Goubau type

Czujnik pokazany na rys. 1 jest rodzajem transformatora – jego wadą jest wysoki poziom pierwszej harmonicznej magnesowania w sygnale wyjściowym.

Przedstawione na rys. 3bcd czujniki są układami różnicowymi umożliwiającymi ograniczenie poziomu pierwszej harmonicznej magnesowania w sygnale wyjściowym.

Czujnik jednorodzeniowy (rys. 3a) bywa stosowany jako element układu generacyjnego którego częstotliwość zależy od mierzonego pola magnetycznego [1].

Czujniki o polach prostopadłych przedstawiono na rys. 4 [1-4].



Rys. 4. Czujniki transduktorowe o polach prostopadłych: a) z rdzeniem drutowym b) z rdzeniem tubowym

Fig. 4. Orthogonal-type fluxgates a) sensor with wire core; b) sensor with tube core

Czujnik pokazany na rys. 4a ma rdzeń wykonany z materiału ferromagnetycznego przez który płynie prąd magnesujący. Jego odmianą jest pokazany na rys. 4b czujnik z rdzeniem tubowym na którym nawinięto uzwojenie magnesujące.

Można spotkać także konstrukcje mieszane w których kierunki pól magnetycznych nie są ani prostopadła ani równoległe. Nie znalazły one jednak szerszych zastosowań.

Przedstawione na rys. 3 i rys. 4 konstrukcje czujników nie wyczerpują wszystkich proponowanych rozwiązań które można znaleźć w literaturze [1-5].

Trwające kilkadziesiąt lat prace wielu badaczy nad transduktorowymi czujnikami pola magnetycznego zaowocowały opracowaniem konstrukcji optymalnych z różnych względów technicznych, np. rozmiarów geometrycznych, czułości czy też poziomu szumów.

Podsumowując przegląd konstrukcji czujników transduktorowych można stwierdzić, że:

- lepszymi parametrami charakteryzują się czujniki z polami równoległymi [1] i są one częściej stosowane od innych konstrukcji,
- z czujników z polami równoległymi różnorodnie zastosowania (i nowe konstrukcje wykonywane różnymi technologiami) znajdują czujniki dwurdzeniowe w układzie Vacquiera i (rzadziej) Förstera oraz najczęściej wykonywane i stosowane czujniki z rdzeniami toroidalnymi.

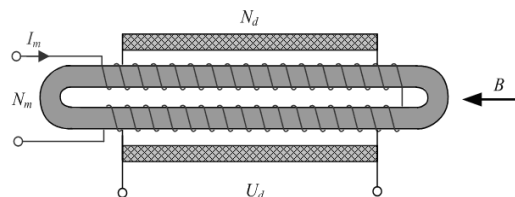
Klasyczny czujnik z rdzeniem toroidalnym (rys. 3d) składa się ze zwiniętego z taśmy, z miękkiego materiału magnetycznego, toroidu na którym nawinięto uzwojenie magnesujące N_d . Rdzeń umieszcza się w płaskim karkasie na którym nawinięto uzwojenie detekcyjne N_d .

W opisie budowy i działania czujnika z rdzeniem toroidalnym [1, 8] używa się często stwierdzenia, że składa się on z dwóch półrdzeni (two half-cores) tworzących zamknięty obwód magnetyczny. Czujniki z zamkniętymi obwodami magnetycznymi charakteryzują się niskim poziomem szumów [8], szczególnie istotnym przy pomiarze słabych pól magnetycznych.

Czujniki z rdzeniami toroidalnymi ze względu na swój kształt i związany z tym wysoki współczynnik demagnetyzacji nie charakteryzują się najwyższą czułością.

Czujnikami o zamkniętych obwodach magnetycznych charakteryzującymi się lepszymi parametrami, to jest niższą wrażliwością na poprzeczne pola magnetyczne oraz wyższą czułością (ze

względem na znacznie niższy współczynnik demagnetyzacji), od toroidalnych są czujniki z rdzeniami owalnymi [8]. Czujnik taki przedstawiono na rys. 5. Na owalnym rdzeniu nawinięto uzwojenie magnesujące N_m i umieszczono w płaskim karkasie na którym nawinięto uzwojenie detekcyjne N_d .



Rys. 5. Czujnik z rdzeniem owalnym

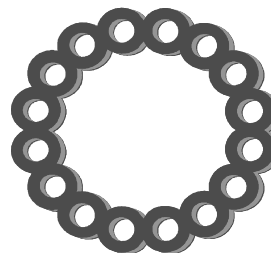
Fig. 5. Race track fluxgate sensor

Ogólnie można stwierdzić, że czujniki transduktorowe charakteryzują się wysoką stabilnością temperaturową czułości i poziomu zera, a czujniki z zamkniętymi obwodami magnetycznymi dodatkowo niskimi szumami [1, 3, 8]. Z tego też względu czujniki z zamkniętymi obwodami magnetycznymi są najczęściej stosowanymi czujnikami transduktorowymi. Wykonuje się je obecnie różnymi technologiami od klasycznych po technologie PCB i CMOS [6-10].

3. Czujniki o specjalnych rdzeniach toroidalnych

Do budowy czujników transduktorowych można wykorzystać specjalnie opracowane rdzenie wykonane początkowo z permaloju P80 [11] a następnie z nowoczesnego materiału nanokrystalicznego magnetycznego typu Finemet [15]. Oba rdzenie czujników są toroidami w których wykonano odpowiednio rozmieszczone otwory.

Rdzeń czujnika złożony z permalojowych kształtek przedstawiono na rys. 6.

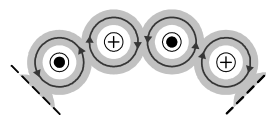


Rys. 6. Rdzeń czujnika

Fig. 6. Core of fluxgate sensor

Rdzeń składa się z pakietu wykrojów z cienkiej blachy permalojowej o wysokiej przenikalności magnetycznej. Wykroje składają z 16 złączonych toroidów rozmieszczonych na obwodzie okręgu – tworzących nowy toroid. Taki kształt rdzenia zapewnia pełne przemagnesowywanie całej objętości rdzenia istotne dla ograniczenia pamięci magnetycznej.

W czujniku z rdzeniem złożonym z kształtek uzwojenie magnesujące przewleka się przez otwory. Linie pola magnesującego rdzeń zmykają się w małych toroidach tworzących rdzeń. Daje to możliwość magnesowania nie tylko całego rdzenia ale także wybranych jego fragmentów (rys. 7).



Rys. 7. Część rdzenia z zaznaczonymi liniami pola magnetycznego

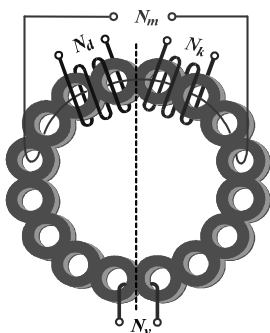
Fig. 7. A part of the special ring-core with magnetizing field lines

Rdzeń można uzwoić na wiele różnych sposobów – zbudować wiele różnych czujników.

Z przeprowadzonych badań różnych wersji czujników wynika, że uzyskanie stabilnych i powtarzalnych parametrów wymaga wprowadzenia szczeliny powietrznej [11] lub szczeliny wirtualnej poprzez zmniejszenie przenikalności magnetycznej fragmentu rdzenia [12-14].

Schemat uzwojenia jednej z wersji czujnika ze szczeliną wirtualną ilustruje rys. 7 [11].

Uzwojenie magnesujące N_m nawinięto (przewleczono) przez połowę (czyli 8) otworów w rdzeniu. Na tej części rdzenia (magnesowanej, a więc czulej na zewnętrzne pole magnetyczne) nawinięto uzwojenie detekcyjne N_d i oraz kompensacyjne N_k . Symetrycznie, naprzeciw tych uzwojeń przez dwa otwory przewleczono uzwojenie N_v sterujące szczeliną wirtualną. Oś geometrycznej symetrii czujnika leży w jego płaszczyźnie i przechodzi przez środek rdzenia i środki jego uzwojeń (rys. 8).



Rys. 8. Czujnik ze szczeliną wirtualną [11]

Fig. 8. Fluxgate sensor with virtual gap [11]

Do wytworzenia szczeliny wirtualnej wykorzystano prąd stały I_v płynący przez uzwojenie N_v .

Czujnik pracował w układzie zamkniętym – ze sprzężeniem zwrotnym. Sygnałem wyjściowym czujnika był prąd kompensacyjny I_k w uzwojeniu kompensacyjnym N_k . Parametrami czujnika można było sterować zmieniając poziom magnesowania szczeliny wirtualnej.

Amorficzne i nanokrystaliczne materiały magnetyczne, ze względu na lepsze parametry magnetyczne, wyparły w praktyce inne stosowane wcześniej materiały na rdzenie czujników transduktorowych. W stosunku do innych miękkich materiałów magnetycznych charakteryzują się one m.in. znacznie wyższą początkową przenikalnością magnetyczną oraz mają lepsze dynamiczne właściwości magnetyczne [15].

Rdzeń wykonany z nanokrystalicznego materiału magnetycznego typu Finemet pokazano na rys. 9 [13, 14, 16].



Rys. 9. Nanokrystaliczny rdzeń czujnika [13, 14, 16]

Fig. 9. Nanocrystalline core of the sensor [13, 14, 16]

Toroidalny rdzeń zwinięto z taśmy o szerokości ok. 9,5 mm i grubości ok. 20 μm . Średnica zewnętrzna powstałego toroidu wyniosła ok. 38 mm. Na obwodzie toroidu wykonano 12 symetrycznie rozmieszczonych otworów umożliwiających przewlekanie uzwojeń. Ze względów technicznych nie było możliwe wykonanie rdzenia z materiału nanokrystalicznego o kształcie pokazanym na rys. 6.

Czujniki z rdzeniem nanokrystalicznym uznają się podobnie jak pokazany na rys. 8. Uwzględnia się przy tym wnioski wynikające z wcześniejszych badań różnych wersji czujników dotyczące sposobu uzwojenia, magnesowania rdzenia i magnesowania szczeliny wirtualnej. W czujnikach tych możliwe jest zastosowanie znacznie wyższych częstotliwości magnesowania rdzenia co wiąże się wprost ze wzrostem czułości. Przedstawiony w [17] czujnik, pracujący w układzie otwartym, charakteryzuje się wysoką czułością sięgającą 16 000 V/T, przy częstotliwości magnesowania $f_m = 8$ kHz.

4. Wnioski

Przedstawiony przegląd czujników transduktorowych obejmuje konstrukcje wykonywane technologiami klasycznymi. Rozmiary geometryczne czujników zawierają się przedziale od kilku milimetrów do kilkudziesięciu centymetrów.

Metodą klasyczną wykonywane są też czujniki ze szczeliną wirtualną. W czujnikach tych uzwojenie detekcyjne N_d nawija się bezpośrednio na rdzeniu (na jego magnesowanej części). Jest to wada, ze względu na konieczność przewlekania znacznej niekiedy liczby zwójów a także na możliwość wprowadzenia szkodliwych naprężeń mechanicznych w rdzeniu, rekompensowana zaletą jaką jest wzrost czułości.

5. Literatura

- [1] P. Ripka: Magnetic sensors and magnetometers. Artech House, Boston, London, 2001.
- [2] J. E. Lenz: A review of magnetic sensors. Proc. of the IEEE, vol. 78, 973–989, 1990.
- [3] P. Ripka: Review of fluxgate sensors. Sensor and Actuators, A 33 (1992), 129-141
- [4] F. Prindahl: The fluxgate magnetometer. J. Phys. E: Sci. Instr., vol. 12, 1979, 241-253.
- [5] M. Nałęcz, J. Jaworski: Miernictwo magnetyczne. WNT, Warszawa 1968.
- [6] H. Grüger, R. Gottfried-Gottfried: Performance and application of a two axes fluxgate magnetic field fabricated by a CMOS process. Sensor and Actuators, A 91 (2001), 61-64.
- [7] O. Dezuari, O. Belloy, S. E. Gilbert, M.A. Gijs: Printed circuit board integrated fluxgate sensor. Sensor and Actuators, A 81 (2000), 200-203.
- [8] P. Ripka: Advances in fluxgate sensors. Sensor and Actuators, A 106 (2003), 8-14.
- [9] A. Tipek, P. Ripka, T. O'Donnell, J. Kubik: PCB technology used in fluxgate sensor construction. Sensor and Actuators, A 115 (2004), 286-292.
- [10] P. Butvin, D. Praslicka, J. Blazek, B. Butwinowa: A relax type wide range field sensor using Finemet. Sensor and Actuators, A 106 (2003), 22–25.
- [11] S. Moskowicz: Porównanie transduktorowych czujników pola magnetycznego o specjalnym rdzeniu. Mat. PPM'05, Oddział PAN w Katowicach Seria Konferencje nr 8, 343-350.
- [12] S. Moskowicz: Przetworniki pomiarowe prądu i pola magnetycznego o specjalnym rdzeniu permalojowym. PAK, 2, 2005, 48-50.
- [13] S. Moskowicz: Transduktorowy czujnik pola magnetycznego z toroidalnym rdzeniem nanokrystalicznym. Mat. PPM'06, Oddział PAN w Katowicach Seria Konferencje nr 11, 155-160.
- [14] S. Moskowicz: Fluxgate sensor based on a special ring core made of nanocrystalline meal ribbons. Przegląd Elektrotechniczny, 11 (2007), 174-177
- [15] R. Kolano, A. Kolano-Burian: Magnetycznie miękkie materiały amorficzne i nanokrystaliczne – nowa generacja materiałów dla elektrotechniki. Przegląd elektrotechniczny, 11(2002), 241-248.
- [16] S. Moskowicz: Czujnik pola magnetycznego z nanokrystalicznym rdzeniem o specjalnej konstrukcji. Elektronika, 6, 2008, 186-187.
- [17] S. Moskowicz: Transduktorowy czujnik pola magnetycznego w układzie otwartym. Przegląd Elektrotechniczny, 12 (2008), w druku.