

Stanisław MOSKOWICZ

POLITECHNIKA SZCZECIŃSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ, ZAKŁAD METROLOGII

## Przetworniki pomiarowe prądu i pola magnetycznego o specjalnym rdzeniu permalojowym

zdjęcie i notka biograficzna autora na stronie 8

### Streszczenie

W artykule przedstawiono przetworniki prądów stałych i zmiennych stosowane w energetyce i energoelektronice. Omówiono zasady działania przetworników wykorzystujących hallotrony oraz wykorzystujących do przetwarzania prądu stałego specjalnie opracowany rdzeń permalojowy. Przedstawiono także zbudowane na bazie opracowanego rdzenia czujniki pola magnetycznego wykorzystywane do bezstykowych pomiarów prądu.

### Abstract

Transformer and transductor-based transducers of current and voltage commonly employed in power electronics and power engineering are presented in the paper. The operation principle of Hall generator based transducers and of those utilizing an especially designed permalloy core for DC measurement is given. Magnetic field sensors based on the developed core that are employed for contactless current measurements are also presented.

**Słowa kluczowe:** Przetwornik transformatorowy, czujnik pola magnetycznego  
**Keywords:** Current transformer, AC and DC transducer, Fluxgate sensors

### 1. Wstęp

Obwody wejściowe aparatury służącej do pomiarów prądów i napięć, stałych i zmiennych oprócz zapewnienia wysokiej dokładności przetwarzania i szerokiego pasma przenoszonych częstotliwości powinny także zapewnić galwaniczne oddzielenie elektronicznych układów przyrządów od obwodów, w których dokonuje się pomiarów.

Do budowy przetworników pomiarowych prądu, stosuje się metody wykorzystujące pole magnetyczne wokół przewodu, przez który przepływa mierzony prąd. Wyróżnić tu można dwie zasadnicze odmiany przetworników: przetworniki z obwodem magnetycznym obejmującym przewód z mierzonym prądem i przetworniki z obwodem magnetycznym otwartym.

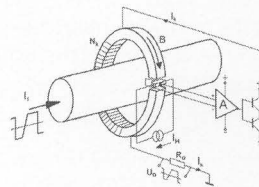
Do pierwszej grupy oprócz klasycznych przekładników można zaliczyć różnego rodzaju przetworniki wykorzystujące rozwierany obwód magnetyczny (przetworniki cęgowe) oraz przetworniki z obwodem magnetycznym, w postaci np. toroidu ze szczeliną, w której umieszczono czujnik pola magnetycznego [1-3].

Do drugiej grupy należą przetworniki wykorzystujące czujniki pola magnetycznego, umieszczone w pewnej odległości od przewodu z mierzonym prądem [4, 5]. Przetworniki pracują w układach o przetwarzaniu bezpośrednim i w układach kompensacyjnych. W układach bezpośrednich natężenie pola magnetycznego jest wprost przetwarzane na sygnał wyjściowy. W układach kompensacyjnych pole magnetyczne pochodzące od mierzonego prądu jest kompensowane polem wytworzonym przez przepływ prądu kompensującego przez odpowiednie uzwojenie kompensujące. Czujnik pola magnetycznego jest w tym przypadku jedynie wskaźnikiem stanu kompensacji.

Należy zauważyć, iż obecnie, przy współczesnej energoelektronice i związanymi z nią odkształconymi przebiegami prądów i napięć, w sygnale wejściowym przetworników może pojawić się składowa stała o wartości, której nie można pominąć przy pomiarach wartości skutecznej przebiegów. Wspomniane wymagania, to jest, wysoka dokładność przetwarzania, izolacja galwaniczna obwodów oraz szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości można osiągnąć na szereg sposobów. Poniżej przedstawiono kilka najczęściej stosowanych metod przetwarzania pozwalających na spełnienie tych wymagań.

### 2. Przetworniki Hallotronowe

Do budowy przetworników pomiarowych zapewniających galwaniczne oddzielenie obwodów pomiarowych i mierzonych wykorzystuje się czujniki pola magnetycznego np. hallotrony umieszczone w odpowiednim obwodzie magnetycznym.



Rys. 1. Schemat ideowy hallotronowego, kompensacyjnego, przetwornika prądów stałych i zmiennych [3]

Fig.1. Diagram of a Hall generator based compensating DC and AC transducer

W metodzie kompensacyjnej, przedstawionej na rys. 1, na rdzeniu ferromagnetycznym nawija się uzwojenie kompensacyjne  $N_k$ , w którym napięcie wyjściowe hallotronu, po wzmocnieniu, wymusza prąd kompensacyjny  $I_k$ , o takiej wartości, by w szczelinie obwodu magnetycznego następowała kompensacja przepływów obwodu pierwotnego i kompensacyjnego, a więc by:  $I_1 N_1 = I_k N_k$ . Hallotron jest w tym przypadku wskaźnikiem kompensacji przepływów obwodów pierwotnego i kompensacyjnego, pod warunkiem, iż w rdzeniu nie występuje pozostałość magnetyczna wywołana wcześniejszym namagnesowaniem. Prąd wyjściowy przetwornika  $I_k$  jest więc równy  $I_k = I_1 N_1 / N_k$ .

Przetworniki tego typu są produkowane przez szwajcarską firmę LEM [3] a także w kraju przez Instytut Tele i Radiotechniczny [2].

Metoda kompensacyjna charakteryzuje się lepszymi parametrami niż metoda bezpośrednia, gdzie sygnałem wyjściowym jest napięcie wyjściowe hallotronu, większą dokładnością przetwarzania, szerszym pasmem częstotliwości, znacznie krótszym czasem odpowiedzi oraz kompensacją czynników zakłócających. Cechą charakterystyczną tych przetworników jest to, że wykorzystują one obwody ferromagnetyczne ze szczeliną, w której umieszczono czujnik pola magnetycznego oraz to, że przewód z mierzonym prądem przechodzi wewnątrz tego obwodu. Inną metodą przetwarzania może być zastosowanie czujników pola magnetycznego, umieszczonych poza przewodem z mierzonym prądem [4, 5].

### 3. Przetworniki Transformatorowo-transduktorowe

Przetworniki prądów zmiennych, zapewniające galwaniczne oddzielenie obwodu pomiarowego i przyrządu, buduje się wykorzystując układy ze sprzężeniem transformatorowym pracujące w układzie automatycznego komparatora prądów zmiennych [6]. Przetworniki tego typu zapewniają wysoką dokładność przetwarzania składowej zmiennej pod warunkiem, że składowa stała płynąca w obwodzie pierwotnym ma znikomą wartość.

W przypadku odkształconych przebiegów prądów i napięć, składowa stała prądu płynącego w obwodzie pierwotnym, zmieniając punkt pracy rdzenia powoduje wielokrotne, zależnie od swej wartości, pogorszenie dokładności przetwarzania. Pogorszenie dokładności przetwarzania oraz fakt, iż dokładne pomiary wartości skutecznej wymagają uwzględnienia składowej stałej skłaniają do poszukiwania rozwiązań konstrukcyjnych przetworników przenoszących obie składowe.

W klasycznych rozwiązaniach do przetwarzania prądu stałego wykorzystuje się przetworniki dwurdzeniowe, pracujące w układzie automatycznego komparatora prądów stałych. W układzie przetwarzającym obie składowe: stałą i zmienną, stosuje się dwa przetworniki: automatyczny komparator prądów zmiennych i dwurdzeniowy automatyczny komparator prądów stałych połączone w jeden układ [3].

W celu zapewnienia wysokiej dokładności przetwarzania konieczne jest, aby oba rdzenie przetwornika prądu stałego miały jednakowe parametry magnetyczne. Problemów z doбором rdzeni można uniknąć stosując jeden rdzeń o specjalnym kształcie [7, 8].

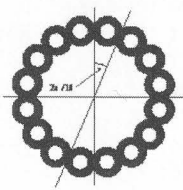
### 3.1. Rdzenie przetwornika prądu stałego

W Zakładzie Metrologii IAP Politechniki Szczecińskiej do budowy przetworników prądu stałego zostały opracowane specjalne rdzenie permalojowe. Jedną z wersji rdzenia przedstawiono na rys. 2.

Rdzeń został wykonany z cienkiej taśmy permalojowej zwiniętej



Rys. 2. Pierwsza wersja rdzenia przetwornika prądu stałego  
Fig. 2. The first version core of the DC transducer



Rys. 3. Kształtka rdzenia przetwornika prądu stałego  
Fig. 3. Core moulding of the DC transducer

w toroid. W toroidzie wykonano promieniowo otwory, symetrycznie i w jednakowej odległości od siebie. Rdzeń, po wykonaniu otworów, poddano odpowiedniej obróbce termicznej.

Uzwojenie magnesujące przewleczone zostało przez wszystkie otwory w rdzeniu, natomiast uzwojenia detekcyjne i kompensujące nawinięto kolejno warstwami na całym obwodzie toroidu.

Przeprowadzone badania wykazały, że taki przetwornik prądu stałego z powodzeniem zastępuje klasyczny przetwornik dwurdzeniowy i charakteryzuje się wysoką dokładnością oraz liniową charakterystyką przetwarzania.

Pewnym problemem, ograniczającym dokładność przetwarzania dla niskich zakresów pomiarowych, tj. niskich przepływów  $I_1 N_1$  strony pierwotnej jest występowanie pamięci magnetycznej rdzenia. Objawia się ona pojawianiem się na wyjściu przetwornika składowej stałej, której poziom jest zależny od „historii” rdzenia, czyli wartości i kierunku ostatniego dużego i nieskompensowanego przepływu  $I_1 N_1$ . Tę składową stałą można zlikwidować poprzez znaczne chwilowe zwiększenie natężenia prądu magnesującego. Należy jednak pamiętać, że utrzymywanie wysokiego natężenia prądu magnesującego jest niekorzystne z różnych względów. Głównym z nich jest to, że następuje zwiększone przenikanie pierwszej harmonicznej przebiegu magnesującego do uzwojenia detekcyjnego, co w efekcie zmniejsza dokładność przetwarzania.

Analiza wyników badań modeli przetwornika oprowadziła do wniosku, że dla zmniejszenia efektu pamięci magnetycznej należy zmodyfikować kształt rdzenia tak, aby zapewnić pełne przemagnesowywanie całej objętości rdzenia. Nowa konstrukcja rdzenia składa się ze specjalnych permalojowych kształtek złożonych w pakiet. Kształtkę taką przedstawiono na rys. 3 [8-10].

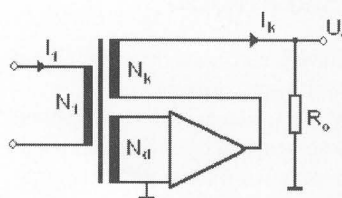
Kształtka wycięta z cienkiej permalojowej blachy składa się jakby z 16 bezpośrednio stykających się ze sobą krążków rozmieszczonych na obwodzie okręgu. Każda następna warstwa rdzenia, składającego się z 16 kształtek, jest obrócona o 1/16 kąta pełnego względem poprzedniej (por. rys. 3). Takie złożenie w pakiet minimalizuje niejednorodności właściwości magnetycznych powstałego rdzenia wynikające z kierunku walcowania blach.

Badania modelowe potwierdziły kilkukrotne zmniejszenie efektu pamięci magnetycznej dla przetworników z rdzeniem złożonym z kształtek pokazanych na rys. 3.

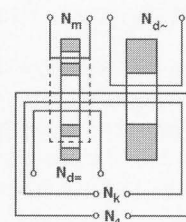
### 3.2. Transformatorowe przetworniki prądu zmiennego

Transformatorowe przetworniki prądu zmiennego (będące w istocie automatycznymi komparatorami prądu zmiennego) zbudowane są w sposób następujący: na toroidalnym rdzeniu wykonanym ze zwiniętej cienkiej taśmy permalojowej nawinięto trzy uzwojenia: detekcyjne  $N_d$ , uzwojenie kompensacyjne (wtórne)  $N_k$  oraz uzwojenie pierwotne  $N_1$ . Schemat ideowy transformatorowego przetwornika prądu zmiennego przedstawiono na rys. 4.

Działanie przetwornika można przedstawić następująco: przepływ prądu  $I_1$  przez uzwojenie pierwotne  $N_1$  wytwarza siłę magnetyczną  $I_1 N_1$  powodującą indukowanie się napięcia w uzwo-



Rys. 4. Schemat ideowy transformatorowego przetwornika prądów zmiennych  
Fig. 4. Diagram of the transformer-based AC transducer



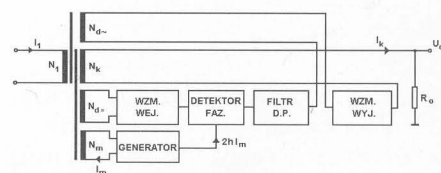
Rys. 5. Schemat uzwojeń przetwornika prądu stałego i zmiennego  
Fig. 5. Winding diagrams of AC and DC transducer

jeniu detekcyjnym  $N_d$ . Napięcie to, poprzez wzmacniacz, wymusza w uzwojeniu wtórnym (kompensacyjnym)  $N_k$  prąd kompensacyjny  $I_k$ , o takiej wartości by napięcie na wejściu wzmacniacza było równe zero. Wtedy następuje zrównanie (kompensacja) przepływów uzwojeń pierwotnego  $N_1$  i kompensacyjnego  $N_k$ , a więc  $I_1 N_1 = I_k N_k$ . Prąd kompensujący  $I_k$  płynący w uzwojeniu kompensującym  $N_k$  jest proporcjonalny do mierzonego prądu  $I_1$ . Pewną odmianą tych przetworników są przetworniki, w których kompensuje się tylko różnicę przepływów uzwojeń pierwotnego i wtórnego [11]

### 3.2. Dwurdzeniowy transformatorowo-transduktorowy przetwornik prądu stałego i zmiennego

Sposób połączenia i uzwojenia rdzeni przetworników prądu stałego i zmiennego w jeden transformatorowo-transduktorowy przetwornik przenoszący obie składowe: stałą i zmienną ilustruje rys. 5 [8]. Rdzenie uzwojono w sposób następujący: przez otwory w rdzeniu prądu stałego przewleczone zostało uzwojenie magnesujące  $N_m$ , a następnie na całym obwodzie toroidu nawinięto uzwojenie detekcyjne prądu stałego  $N_{d-}$ . Na całym obwodzie rdzenia prądu zmiennego nawinięto uzwojenie detekcyjne prądu zmiennego  $N_{d+}$ . Na oba rdzenie złożone razem nawinięto wspólne dla obu rdzeni uzwojenia: kompensacyjne  $N_k$  i pierwotne  $N_1$ .

Schemat blokowy transformatorowo-transduktorowego przetwornika prądu stałego i zmiennego przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Schemat blokowy transformatorowo-transduktorowego przetwornika prądu stałego i zmiennego  
Fig. 6. Block diagram of the transformer-transducer AC and DC transducer

Jak widać na rys. 6, tory przetwarzania składowej stałej i zmiennych mają wspólny wzmacniacz wyjściowy i uzwojenie kompensujące  $N_k$ . Wyjściowy prąd kompensacyjny  $I_k$  jest proporcjonalny do prądu wejściowego  $I_1$  i zawiera obie składowe: stałą i zmienną.

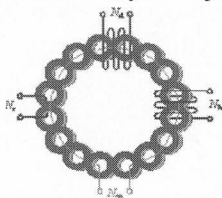
Dokładność przetwarzania obu składowych jest na poziomie setnych części procenta, przy paśmie częstotliwości do kilku kHz. Pewnym problemem ograniczającym dokładność dla przetwarzania składowej stałej dla niskich zakresów pomiarowych jest występowanie pamięci magnetycznej rdzenia prądu stałego (kilkakrotnie mniejszej niż dla przetwornika z rdzeniem pokazanym na rys.2.).

W trójrdzeniowych przetwornikach typu IT firmy LEM [3], do przetwarzania prądu stałego zastosowano klasyczne rozwiązanie dwurdzeniowego detektora stałego strumienia magnetycznego połączonego w jeden układ z automatycznym komparatorem prądów zmiennych. Przetworniki te charakteryzują się bardzo wysoką dokładnością przetwarzania, na poziomie setnych a nawet tysięcznych części procenta dla wyższych zakresów pomiarowych.



#### 4. Bezstykowe Przetworniki Prądów

W przypadku prądów stałych o dużych natężeniach pojawiają się problemy wynikające z ograniczonych wymiarów geometrycznych rdzenia przetwornika prądu stałego oraz trudności z wytworzeniem odpowiednio dużego przepływu kompensującego. Stąd też podjęto próbę budowy bezstykowych przetworników wykorzystujących oddziaływanie pola magnetycznego przewodu z mierzonym prądem na czujnik pola magnetycznego. Istnieje wiele rozwiązań transduktorowych czujników pola magnetycznego [12- 14].



Rys. 7. Czujnik ze szczeliną wirtualną  
Fig. 7. Fluxgate sensor with virtual gap

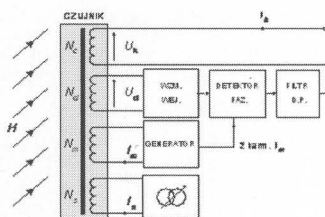
Na bazie rdzenia złożonego z kształtek pokazanych na rys. 3 możliwa jest budowa kilku wersji czujników. A więc czujników:

- wykorzystujących rdzeń z złożony z pełnej kształtki [9],
- wykorzystujących rdzeń z złożony z pełnej kształtki, ale ze szczeliną rdzeniu [10]
- wykorzystujących rdzeń z złożony z pełnej kształtki, ale z tzw. szczeliną wirtualną.

Budowę czujnika z wirtualną szczeliną przedstawia rys. 7. W prezentowanym rozwiązaniu w rdzeniu nie wykonano szczeliny fizycznej, ale nawinięto uzwojenie sterujące  $N_s$ .

Uzwojenia nawinięto w sposób następujący. Przez wszystkie 16 toroidów rozmieszczonych na obwodzie okręgu przewleczono zostało uzwojenie magnesujące  $N_m$ . Następnie przez dwa otwory w rdzeniu przewleczono dodatkowo uzwojenie sterujące magnesowaniem „wirtualnej” szczeliny  $N_s$ , i kolejno na całym obwodzie toroidu nawinięto jednowarstwowo uzwojenia detekcyjne  $N_d$  oraz kompensacyjne  $N_k$ .

Blokowy układ pracy czujnika przedstawia rys. 8.



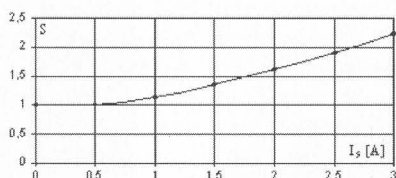
Rys. 8. Schemat blokowy czujnika  
Fig. 8. Block diagram of the sensor

Zasadę pracy czujnika można przedstawić następująco. Prąd magnesujący rdzeń steruje jego przenikalnością magnetyczną i wprowadza go w głębokie nasycenie. Na uzwojeniu detekcyjnym pojawia się napięcie zawierające parzyste harmoniczne przebiegu magnesującego rdzeń w momentach, gdy nie jest on nasycony. Napięcie to po wzmocnieniu i detekcji fazoczułej powoduje przepływ prądu kompensującego  $I_k$  przez uzwojenie kompensacyjne  $N_k$ . Prąd ten jest sygnałem wyjściowym czujnika.

Badany model czujnika charakteryzował się następującymi parametrami:

- toroidalny rdzeń został złożony z wykrojów, z blachy permalowej (o grubości ok. 0,1 mm) w pakiet o grubości ok. 5 mm,
- liczba zwojów uzwojeń: magnesujące  $N_m = 8$ ; detekcyjne  $N_d = 300$ ; kompensacyjne  $N_k = 300$ , sterujące szczeliną  $N_s = 2$ .

Czujnik badano w polu magnetycznym ziemi oraz w polu wytworzonym przez cewki Helmholtza.



Rys. 9. Zależność czułości względnej  $S$  od prądu  $I_s$  magnesującego szczelinę  
Fig. 9. Relative sensitivity  $S$  vs. virtual gap magnetizing current  $I_s$

Na rys. 9 przedstawiono zależność czułości czujnika od natężenia prądu stałego  $I_s$  magnesującego dwa „ogniwa” rdzenia tworzące „wirtualną szczelinę”. Pomiary wykonano w polu magnetycznym o natężeniu 140 A/m.

Jak widać na rys. 9 względna czułość czujnika  $S$  wzrasta wraz prądem magnesującym szczelinę. Ten wzrost czułości dla większych prądów sterujących  $I_s$  jest ponad dwukrotny. Po przekroczeniu prądu  $I_s$  ok. 1A zależność staje się bliska liniowej.

#### Wnioski

Przedstawione rozwiązania układowe przetworników prądów stałych i zmiennych zapewniające galwaniczną izolację obwodów pomiarowych i badanych charakteryzują się szerokim pasmem przenoszonych częstotliwości, wysoką dokładnością przetwarzania (dla przetworników wielordzeniowych) oraz szerokimi zakresami pomiarowymi.

Układy kompensacyjne wykorzystujące przetworniki wielordzeniowe, bez szczeliny w rdzeniach, w których detekcja niezrównoważenia przepływów odbywa się bezpośrednio w rdzeniu [8] lub rdzeniach [3], charakteryzują się znacznie wyższą dokładnością przetwarzania oraz ograniczeniem wpływu czynników zakłócających. Wynika to z jednorodności obwodów magnetycznych, która zmniejsza wpływ pamięci magnetycznej oraz ogranicza wpływ zewnętrznych pól magnetycznych. Przetworniki dwu- i trójrdzeniowe charakteryzują się porównywalną dokładnością przetwarzania. Dwurdzeniowe, wykorzystujące specjalny rdzeń przedstawiony na rys. 3 eliminują wpływ różnicy parametrów magnetycznych rdzeni oraz pozwalają na zmniejszenie rozmiarów geometrycznych przetworników.

Z wyników badań transduktorowego czujnika z wirtualną szczeliną można wyciągnąć następujące wnioski:

- czujnik charakteryzuje się stosunkowo wysoką czułością,
- wprowadzenie wirtualnej szczeliny pozwala na regulowanie czułości czujnika poprzez zmianę natężenia prądu sterującego  $I_s$  (wynika to z rys. 9),

W świetle przeprowadzonych badań właściwie wydaje się rozdzielanie obwodów magnetycznych magnesowania rdzenia czujnika od magnesowania tworzącego szczelinę. Tzn. fragment rdzenia tworzący szczelinę nie powinien być dodatkowo magnesowany prądem magnesującym rdzeń.

#### Literatura

- [1] Sawicki J., Gosiński J., Kaniuka J., Wutkowski R.: *Halotronowy przekładnik prądu stałego*, Mat. V Krajowej Konf. Metrologii, s. 167 – 169, Poznań, 1972.
- [2] Kobendza A., Choraży M.: *Pomiar wartości chwilowej prądu za pomocą hallotronowych przetworników prądowych*, Mat. IV Krajowego Sympozjum Pomiarów Magnetycznych, Kielce – Borków, s. 139 – 143, Kielce, 1994.
- [3] *LEM Industrial Transducers Catalogue 1996/97*, LEM Geneva, Switzerland, 1996.
- [4] Moskowicz S.: *Bezstykowy przetwornik pomiarowy dużych prądów* Mat. XXVII Międzuczelnianej Konferencji Metrologów, s. 284 – 292, Zielona Góra, 1995.
- [5] Janiczek R.: *Metoda określania wartości natężenia prądu elektrycznego płynącego w przewodzie na podstawie pomiarów magnetycznych*, Mat. III Krajowego Sympozjum Pomiarów Magnetycznych, s. 85 – 90, Kielce, 1991.
- [6] Miłek M.: *Magnetyczne komparatory prądowe w pomiarach elektrycznych*, WNT, Warszawa, 1990.
- [7] Kubisa S., Moskowicz S.: *Rdzeń ferromagnetyczny zwłaszcza do przetworników pomiarowych prądu stałego*, Patent nr 269886.
- [8] Moskowicz S.: *AC and DC transformer and transducer measuring transducer*, Przegląd Elektrotechniczny, 11, 2003, pp.854–856.
- [9] Moskowicz S.: *Transduktorowy czujnik pola magnetycznego – analiza funkcji przetwarzania*, Elektronizacja, nr 7 – 8, 2002, s. 32 – 34.
- [10] Moskowicz S.: *Fluxgate sensor with a special permalloy core – construction and investigation*, Proc. of the 4<sup>th</sup> International Conference on Measurement, Smolenice, 2003, pp. 423 – 426.
- [11] Daponte P.: *Electronically compensated current transformer modelling*, Measurement 15(1995), pp.213 – 222.
- [12] Nałęcz M., Jaworski J.: *Miernictwo magnetyczne*, WNT, Warszawa 1968.
- [13] P. Ripka.: *Review of fluxgate sensors*, Sensor and Actuators, A.33 (1992) pp.129 – 141.
- [14] Lenz J. E.: *A Review of Magnetic Sensors*, Proc. of the IEEE, vol. 78, pp. 973 – 989, 1990.

**Title:** Special permalloy based transducers for measurement of current and magnetic field