

prąd, indukcyjny przetwornik prądu

Daniel DUSZA*, Łukasz MISZTALEWSKI

PŁASKIE PRZETWORNIKI PRĄDU

Przedstawiono przetwornik indukcyjny prądu w postaci dwóch płaskich cewek połączonych szeregowo i zgodnie obejmujących strumień wytwarzany przez prąd płynący w szynie. Wykonano i przeprowadzono badania przetwornika składającego się z cewek nawiniętych drutem oraz cewek wykonanych w technologii PCB. Przedstawiono wyniki błęd przetwarzania w odniesieniu do wyników uzyskanych z rezystora wzorcowego oraz wyniki badań wpływu zewnętrznych pól magnetycznych na dokładność przetwarzania.

1. WSTĘP

Energia w systemie elektroenergetycznym jest przenoszona przez prąd w przewodach, których potencjały znacznie różnią się od potencjału zerowego. Czujnik prądu sieciowego musi więc przede wszystkim zapewnić izolację galwaniczną obwodu sygnałowego od obwodu prądowego. Naturalną izolację galwaniczną otrzymuje się przez indukcyjne sprzężenie obwodów.

Do przetwarzania prądu sieciowego powszechnie stosuje się przekładniki prądowe. W przekładniku prądowym obwody są sprzężone przez strumień magnetyczny zamykający się w magnetowodzie ferromagnetycznym. Prąd w obwodzie sygnałowym (wtórny) jest w przybliżeniu proporcjonalny do prądu przetwarzanego (pierwotnego). Błąd przetwarzania (proporcjonalności) jest spowodowany przez prąd polaryzacji, który jest konieczny do wytworzenia strumienia magnetycznego w magnetowodzie ferromagnetycznym. Prąd polaryzacji, a więc i błąd przetwarzania zależy głównie od przenikalności magnetowodu i parametrów przekładnika. Przekładnik prądowy ma ograniczony zakres liniowości, wąskie pasmo przenoszonych częstotliwości, w ogóle nie przenosi składowej stałej prądu.

W przetworniku indukcyjnym obwody są sprzężone przez strumień magnetyczny proporcjonalny do przetwarzanego prądu. Sygnał indukowany w obwodzie wyjścio-

* Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: daniel.dusza@pwr.edu.pl

wym przetwornika jest dokładnie proporcjonalny do pochodnej prądu, a współczynnik proporcjonalności jest stały dla dowolnych wartości prądu w szerokim paśmie częstotliwości.

Przetworniki indukcyjne są stosowane do przetwarzania prądu sieciowego, w postaci cewki Rogowskiego [1], którą można objąć przewody wiodące prąd. Cewka Rogowskiego nie zapewnia jednak dokładnie równomiernego rozłożenia zwojów na zamkniętym obwodzie, co powoduje, że w uzwojeniu mogą się indukować obce sygnały pochodzące od pól zakłócających. Obecnie trwają intensywne badania nad przetwornikami prądu wykonanymi w technologii PCB [2–7], jednakże rozwiązania te nie zawsze nadają się do pomiarów prądu o częstotliwości przemysłowej, bądź są ekonomicznie nieuzasadnione. W niniejszej pracy przedstawiono czujnik indukcyjny w postaci cewki płaskiej reprezentowanej przez odpowiednio ułożone ścieżki na obwodzie drukowanym oraz w postaci cewki płaskiej nawiniętej na laminacie, która jest odpowiednikiem obwodu drukowanego.

2. KONSTRUKCJE

W prezentowanych poniżej rozwiązaniach ważne jest zamknięcie obwodu magnetycznego w celu pełnego objęcia strumienia magnetycznego wytwarzanego przez badany przewodnik z prądem. W tym celu połączono szeregowo (zgodnie) dwie cewki i przyłożono każdą z cewek po przeciwnych stronach cienkiej taśmy miedzianej, przez którą płynął prąd. Grubość taśmy i laminatu (1 mm) jest na tyle mała, że rozproszenie strumienia na krawędziach miedzianej taśmy można pominąć.

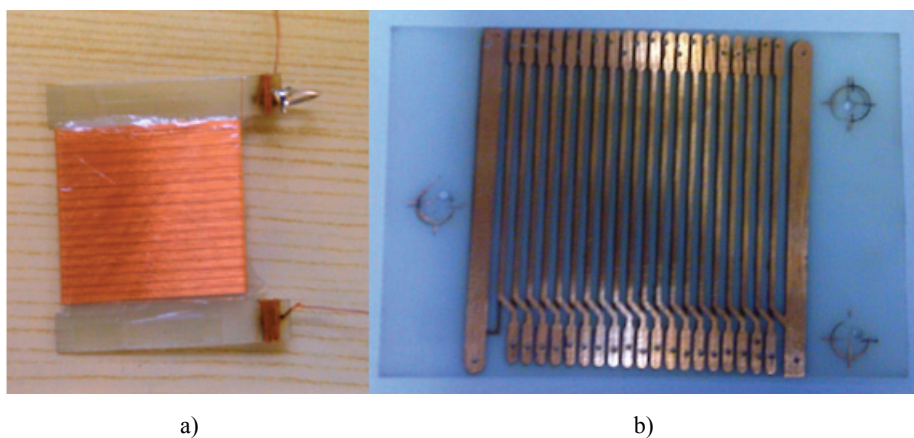
2.1. PRZETWORNIK PCB

Ze względu na to, że przy pomiarach prądu metodą zaproponowaną w niniejszej pracy duży wpływ na pomiar mają zakłócenia, które zmieniają rozkład pola magnetycznego i które indukują w cewkach siłę elektromagnetyczną, należało zadbać o minimalizację tego problemu. W tym celu każda ścieżka po jednej stronie laminatu jest odbiciem lustrzanym ścieżki po drugiej stronie laminatu. Ścieżki obwodu pomiarowego mają stały względem siebie odstęp, stałą szerokość ścieżki i stałą grubość warstwy miedzi. Ścieżki obwodu prądowego mają stałą szerokość i grubość warstwy miedzi. Przy pomiarach prądu cewką Rogowskiego istotna jest indukowana SEM w obwodzie pomiarowym, która jest proporcjonalna do pochodnej prądu. Ważne zatem, jest symetryczne umiejscowienie ścieżek oraz wzmocnienie tego sygnału poprzez utworzenie dużej liczby zwojów. W przetworniku prądowym wykonanym w technologii PCB (rys. 1b) zastosowano ścieżki o szerokości 0,8 mm imitując układ złożony z nawiniętych cewek Rogowskiego. Powyższy przetwornik został wykonany w taki sposób, że na każdej stronie płytki znajduje się połowa jednego zwoju, a obie połówki są zwarte

dzięki metalizowanej przelotce. Szerokość ścieżki wynosi 0,3 mm, otwory przelotek (pomiędzy połówkami zwojów) mają średnicę 0,4 mm a na początku i końcu uzwojenia mają szerokość 0,8 mm.

2.2. CEWKA PŁASKA

Zastosowano również przetwornik prądowy wykonany z nawiniętego maszynowo drutu na karkas z laminatu. Wykonany przetwornik składa się z 220 zwojów wykonanych z drutu miedzianego o średnicy 0,07 mm (rys. 1a). Szkic przetwornika obrazuje rysunek 2.



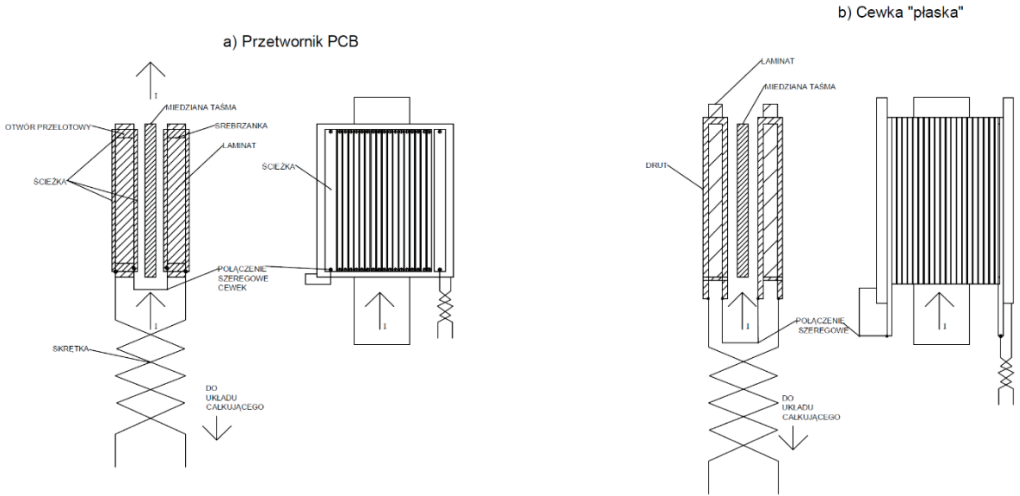
Rys. 1. Przetwornik prądowy: a) cewka płaska, b) wersja PCB

Sygnal wyjściowy $e(t)$ z czujnika indukcyjnego jest proporcjonalny do pochodnej mierzonego prądu. Po scałkowaniu tego sygnału w granicy połowy okresu otrzymamy wartość średnią indukowanego w cewkach przetwornika sygnału napięciowego proporcjonalnego do wartości maksymalnej prądu [8]:

$$\bar{E} = \frac{2}{T} N \mu S l \int_0^{\frac{T}{2}} -d(i(t)) = 2 f N \mu S \frac{1}{l} \left(- \left[i \left(\frac{T}{2} \right) - i(\mathbf{0}) \right] \right). \quad (1)$$

Zakłada się, że wektor indukcji pola magnetycznego jest prostopadły do powierzchni S . Powierzchnia S jest powierzchnią objętą przez nawiniętą cewkę. W związku z tym, iż cewka jest nawinięta na laminat PCB, to powierzchnia S równa jest przekrojowi prostokątnemu tego laminatu o bokach a (grubość) i b (szerokość), długość l jest równa wymiarowi $2 \cdot b$ (połączone szeregowo dwie cewki płaskie), N jest suma-

ryczną liczbą zwojów, ψ jest jednostkowym (przypadającym na jeden zwoj) strumieniem pola magnetycznego.



Rys. 2. Szkic przetwornika prądowego a) PCB, b) cewka płaska

W sieciach elektroenergetycznych przebiegi czasowe prądów spełniają warunek nieparzystości funkcji ciągłej. W związku z powyższymi można zapisać równanie (1) w postaci:

$$\bar{E} = 4fN\mu S \frac{1}{l} I_{\max} = 4fN\psi_{\max}. \quad (2)$$

Wartość skuteczna napięcia na wyjściu układu całkującego:

$$E = 1,11\bar{E}. \quad (3)$$

Wartość skuteczną prądu można wyznaczyć z zależności (2) i (3):

$$I = \frac{El}{4fN\mu S}. \quad (4)$$

Aby wykazać zmianę wartości sygnału wyjściowego z badanego przetwornika przeprowadzono symulację wykonując obliczenia zgodnie ze wzorem (2) dla różnych wartości częstotliwości badanego sygnału oraz liczby zwojów przetwornika w funkcji sygnału mierzonego. Wyniki symulacji zaprezentowano na rysunkach 3 i 4.

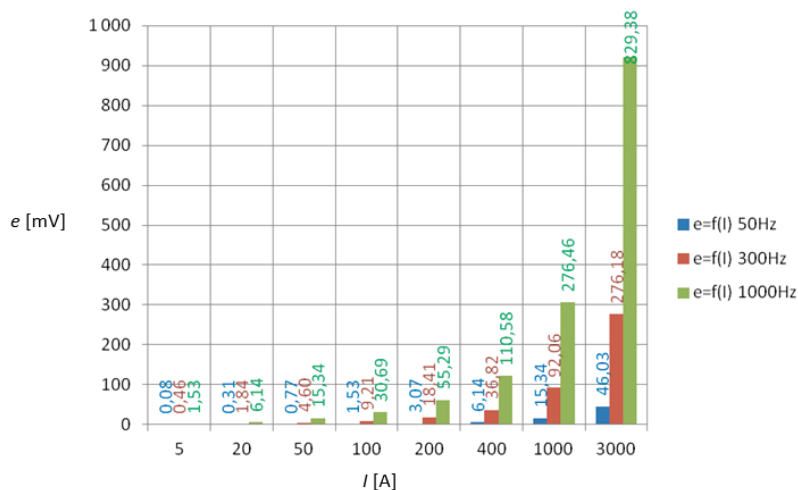
Z przeprowadzonej symulacji wynika, że wraz z zwiększaniem częstotliwości mierzonego sygnału (w tym wypadku prądu) oraz liczby zwojów, zwiększeniu ulega in-

dukowane napięcie na zaciskach wyjściowych przetwornika a tym samym powinna zwiększyć się jego czułość. Symulację przeprowadzono dla parametrów prototypu przetwornika opartego na technologii PCB:

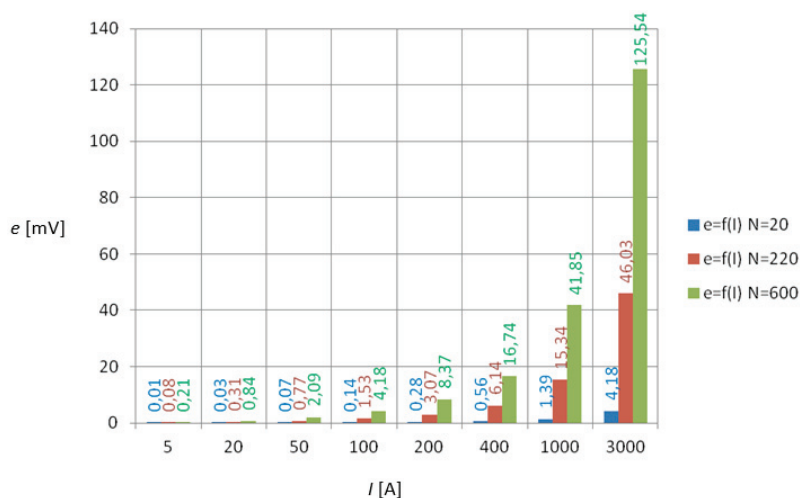
$$a = 0,0005 \text{ m}, b = 0,025 \text{ m},$$

$$N \text{ (jednego przetwornika)} = 220 \text{ zwojów},$$

$$\mu = 1,25564 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}.$$



Rys. 3. Zmiany napięcia indukowanego e w funkcji częstotliwości, $N = 220$ zwojów



Rys. 4. Zmiany napięcia indukowanego e w funkcji liczby zwojów przetwornika, $f = 50$ Hz

3. WYNIKI BADAŃ

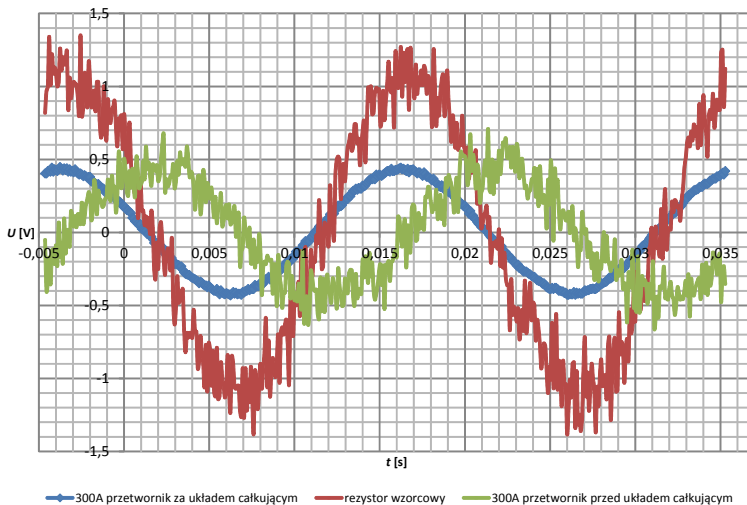
Układ pomiarowy składał się z autotransformatora oraz transformatora separacyjnego połączonych równolegle. Po stronie wtórnej transformatora separacyjnego włączono szeregowo dławik wraz z ruchomą zworą, badany przetwornik umieszczony na miedzianej szynie, giętka cewka Rogowskiego oraz rezystor wzorcowy 600 A 150 mV, który zamykał obwód.

Badania przeprowadzono dla przebiegów sinusoidalnych jak i dla odkształconych. Podczas badania sygnałów wyjściowych z układów całkujących zmieniano wartość prądu pierwotnego w zakresie 50 A÷400 A (dla prądu nieodkształconego) oraz w zakresie 10 A÷150 A dla prądów odkształconych. Ograniczenia zakresu prądowego są spowodowane zastosowaną budową stanowiska laboratoryjnego.

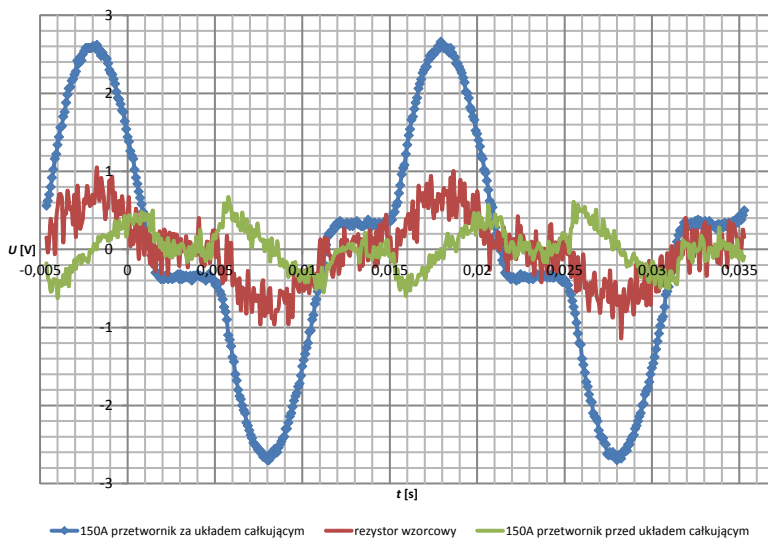
Podczas tego badania zakładano na szynę prądową dwa szeregowo (zgodnie) połączone przetworniki tak, aby szyna znajdowała się między nimi a pole było prostopadłe do powierzchni ograniczonej obwodem cewki, zgodnie z prawem Ampera. Przetworniki przylegały dokładnie do powierzchni szyny.

3.1. BADANIE SYGNAŁU WYJŚCIOWEGO PRZETWORNIKA

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań dla dwóch szeregowo i zgodnie połączonych przetworników prądu w formie cewki płaskiej nawiniętej drutem na karkas z laminatu dla sygnału sinusoidalnego. Na rysunku 6 pokazano natomiast przebiegi sygnałów dla prądu odkształconego.



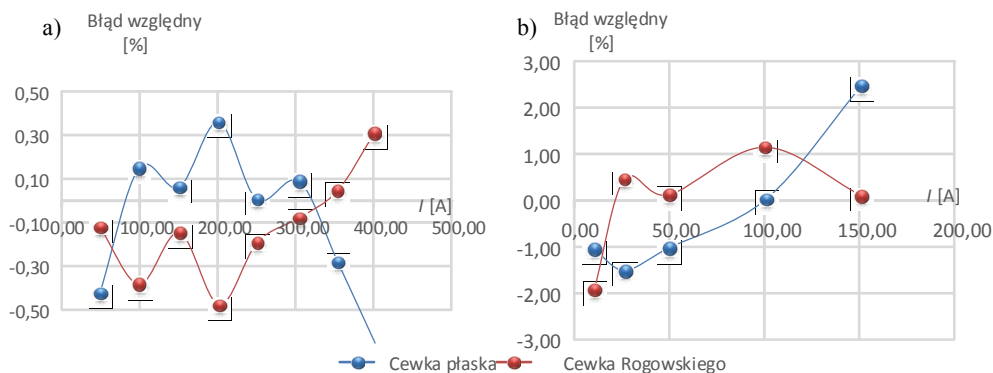
Rys. 5. Przebiegi napięć na wyjściu układu całkującego z przetwornikiem nawiniętym drutem, prąd 300 A



Rys. 6. Przebiegi napięć na wyjściu analogowego układu całkującego z przetwornikiem nawiniętym drutem, prąd 150 A

Poniżej przedstawiono wykresy błęd przetwarzania sygnału prądowego przez badany przetwornik i cewkę Rogowskiego w funkcji prądu bocznika dla sygnału sinusoidalnego i odkształconego. Błąd liczono według poniższej zależności:

$$\delta I_R = \frac{I_{\text{cewki}} - I_{\text{bocznika}}}{I_{\text{bocznika}}} \cdot 100\% . \quad (5)$$



Rys. 7. Błąd względny przetwarzania sygnału prądowego, badany przetwornik o $N = 220$ zwojów: a) przebieg sinusoidalny, b) przebieg odkształcony

Obydwa przetworniki charakteryzują się liniowością w przetwarzaniu mierzonego sygnału.

3.2. WPŁYW ZAKŁÓCEŃ

Normalną pracę przetwornika obrazuje rysunek 2, gdzie dwie cewki płaskie połączone są szeregowo i zgodnie i obejmują przewód (szynę) wiodący prąd. W celu określenia wpływu zewnętrznych pól magnetycznych na sygnał wejściowy wystarczające jest, aby przetwornik umieścić w pobliżu przewodu wiodącego prąd o takiej samej wartości jak w normalnej pracy przetwornika i odczytać wartości napięć indukowanych na wyjściu układu przetwornika. W idealnym przetworniku wartość ta powinna wynosić zero. Podczas pomiarów zauważono, że umieszczenie jednej cewki o liczbie zwojów $N = 20$ kierunkiem nawijania uzwojeń zgodnie z kierunkiem wirowania pola magnetycznego pochodzącego od przewodu wiodącego prąd powoduje, że sygnał indukowany na wyjściu przetwornika jest przesunięty o 180 stopni względem poprzednich pomiarów przy użyciu dwóch przetworników połączonych szeregowo i zgodnie. W tabeli 1 przedstawiono wpływ zakłóceń na indukowane napięcie na zaciskach wyjściowych przetwornika prądowego mierzącego sygnał prądowy na przewodzącej szynie.

Tabela 1. Wpływ zakłóceń

N	I	U	Umieszczenie przetwornika
zw.	A	mV	–
220	400	4,0	przy szynie
220	200	3,2	przy szynie
220	200	3,3	odległość na grubość laminatu (a)
220	200	3,8	$2x a$
220	400	5,0	$2x a$
20	200	720	przy szynie

Wpływ zakłóceń na przetwornik o liczbie zwojów $N = 220$ oraz nawiniętym uzwojeniu jest niewielki i podczas umieszczania przetwornika na szynie i w różnych odległościach od niej był praktycznie stały i średnio wyniósł 3,9 mV wartości sygnału indukowanego na zaciskach wyjściowych układu całkowitego, podczas gdy dla przetwornika PCB o liczbie zwojów $N = 20$ ten sam sygnał wyniósł 720 mV, co potwierdza, że liczba zwojów ma wpływ na odpowiednie zamknięcie się strumienia magnetycznego pochodzącego od mierzonego prądu. Przetworniki o małej liczbie zwojów i nie obejmujące dokładnie szyny przewodzącej prąd charakteryzują się dużą wrażliwością na zakłócenia od zewnętrznych pól magnetycznych.

4. WNIOSKI

Zastosowany w pomiarach przetwornik charakteryzuje się małym błędem przetwarzania w zakresie badanych prądów sinusoidalnych (0,5%), natomiast w zakresie prądów odkształconych błąd jest mniejszy niż 2%. Za pomocą badanego przetwornika uzyskuje się wyższe wartości sygnału pomiarowego niż za pomocą giętkiej cewki Rogowskiego.

Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że na wartość, kształt i jakość uzyskanego sygnału wpływ mają nie tylko liczba zwojów, ich równomierne i symetryczne ułożenie czy odpowiednie zamknięcie obwodu magnetycznego ale także poprawnie zaprojektowany układ całujący. W pracy wykorzystano analogowy układ całujący wykorzystywany w giętkich cewkach Rogowskiego firmy Fluke. Przetwornik PCB o mniejszej liczbie zwojów charakteryzował się mniejszym błędem przetwarzania w zakresie prądu odkształconego i podobnym błędem w zakresie prądu sinusoidalnego w stosunku do przetwornika płaskiego o liczbie zwojów 220, natomiast okazał się bardzo wrażliwy na zakłócenia pochodzące od zewnętrznego pola magnetycznego.

Obwody drukowane w stosunku do tradycyjnie wykonywanych uzwojeń do przetworników mają istotne wady. Umożliwiają stosunkowo małą gęstość uzwojenia (N/l , N – liczba uzwojeń, l – długość karkasu) w stosunku do przetworników nawiniętych drutem. Prowadzone są prace nad frezowaniem ścieżek przewodzących w laminacie za pomocą głowic frezarskich (takie ścieżki zalewane są odpowiednim stopem). Takie rozwiązanie jest jednak nadal zbyt drogie i pracochłonne oraz nie umożliwia tworzenia giętkich ścieżek, dlatego też obecnie nie ma możliwości ekonomicznego zwiększenia gęstości liczby uzwojeń poprzez ich bardzo bliskie rozmieszczenie obok siebie. Zastosowanie technologii PCB ma uzasadnienie dla wyższych wartości częstotliwości, natomiast dla częstotliwości przemysłowej rozsądniejsze (ze względów ekonomicznych) wydaje się stosowanie cewek płaskich nawiniętych drutem miedzianym o określonej średnicy.

LITERATURA

- [1] NOWAK J., *Przetwarzanie wielkości charakteryzujących pole magnetyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005, 21–22.
- [2] CHEN QING, LI HONG-BIN, CHEN XIAO, DENG YIN, LIU YAN-BIN, *PCB Rogowski Sensor Designs for Plasma Current Measurement*, CEEE of Huazhong University of Science and Technology, Fusion Engineering, SOFE 2007, 17–21 June 2007, IEEE 22nd Symposium, Albuquerque, NM, 1–4.
- [3] CHU XIANGHU, ZENG XIANGJUN, DENG FENG, LI LING, *Novel PCB Sensor based on Rogowski Coil for Transmission Lines Fault Detection*, Power & Energy Society General Meeting, 26–30 July 2009, PES '09, IEEE, Calgary, AB, 1–4.

- [4] BASCHIROTTO A., DALLAGO E., MALCOVATI P., MARCHESI M., VENCHI G., ROSSINI A., *Multilayer PCB Planar Fluxgate Magnetic Sensor*, Research in Microelectronics and Electronics Ph.D., Otranto, 2006, 413–416.
- [5] RIPKA P., KUBIK J., DUFFY M., HURLEY W. G., O'REILLY S., *Current Sensor in PCB Technology*, Sensor Journal, IEEE, Vol. 5, Iss. 3, June 2005, 433–438.
- [6] DAMNJANOVIC M.S., ZIVANOV L.D., NAGY L.F., DJURIC S.M., BIBERDZIC B.N., *A Novel Approach to Extending the Linearity Range of Displacement Inductive Sensor*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, November 2008.
- [7] SZKÓŁKA S., *Cewka Rogowskiego w układzie pomiarowym mocy czynnej w obwodach nieliniowych*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 87, nr 9a, 2011, 353–355.

PLANAR CURRENT TRANSDUCERS

The paper presents the inductive current sensor in form of two planar coils connected in series and in accordance covering flux produced by the current flowing in a rail. Transducer was done and tested in form of two flat coils made from a wire-wound coils and the coils made in PCB technology. The results of the processing error in relation to the results obtained from the standard resistor and testing results of external magnetic fields effects on processing accuracy.