

Daniel DUSZA, Józef NOWAKPOLITECHNIKA WROCLAWSKA, INSTYTUT MASZYN, NAPĘDÓW I POMIARÓW ELEKTRYCZNYCH,
Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław**Indukcyjny przetwornik prądu sieciowego ze zworami ferromagnetycznymi****Dr inż. Daniel DUSZA**

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej, adiunkt w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Kierownik Laboratorium Miernictwa Elektrycznego. Specjalizuje się w zakresie metrologii elektrycznej. Główne zainteresowania dotyczą konstrukcji przekładników i przetworników prądu sieciowego, układów do ich sprawdzania oraz cyfrowych systemów pomiarowych.



e-mail: daniel.dusza@pwr.wroc.pl

Dr inż. Józef NOWAK

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej, następnie jej pracownik, obecnie na emeryturze. Jest specjalistą z dziedziny pomiarów wielkości magnetycznych. Opracował między innymi nową metodę pomiaru charakterystyk próbek magnesów za pomocą halotronów



e-mail: jozef.nowak@pwr.wroc.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości modeli przetworników prądu sieciowego składających się z cewek cylindrycznych zwartych magnetowodami ferromagnetycznymi. Otrzymane wyniki dowodzą, że można osiągnąć dużą czułość przetwarzania, dobrą liniowość oraz dużą odporność na zakłócenia elektromagnetyczne przetworników charakteryzujących się prostą technologią realizacji. Przetworniki ze zworami ferromagnetycznymi mogą być montowane na przewodach prądowych bez przerywania obwodu prądowego.

Słowa kluczowe: prąd, przetwarzanie, przetwornik indukcyjny.

Power line current sensor with ferromagnetic cramps**Abstract**

The paper deals with an inductive current transducer in the form of cylindrical coils (Fig. 2) with ferromagnetic cramps (Figs. 3 and 4). The investigation results of properties and influence of external magnetic fields on the processing accuracy are presented. They show that it is possible to achieve high sensitivity, good linearity of the transient characteristic (Fig. 6) and high resistance to electromagnetic disturbances (Fig. 5 shows the results for a transducer with four coils, while Fig. 7. for a transducer with two coils). Use of cramps made of permalloy enables obtaining better results (Fig. 8). The proposed solution for current transducer construction is characterized by implementation of simple technology. Transducers with ferromagnetic cramps (ferrite, permalloy, electrical sheet, nanocrystalline materials) can be installed on current wires without breaking a current circuit. Research of the influence of disturbances from external magnetic fields plays a key role in the quality assessment of current transducers.

Keywords: current, processing, current sensor.

1. Wprowadzenie

Przetworniki indukcyjne, ze względu na galwaniczną izolację obwodu sygnałowego od obwodu prądowego, mogą być stosowane do przetwarzania prądu sieciowego. Aktualnie są produkowane i stosowane przetworniki indukcyjne w postaci cewki Rogowskiego nawiniętej na giętkim karkasie [2]. Cewką Rogowskiego o giętkim karkasie obejmuje się przewód, w którym przepływa przetwarzany prąd, bez przerywania jego obwodu. Długość cewki dla takiego rozwiązania jest duża w porównaniu ze średnicą jej przekroju poprzecznego. Na giętkim karkasie nawinięta jest tylko jedna warstwa zwojów. Po złączeniu początku i końca cewki, ta jedna warstwa tworzy wypadkową pętlę, w której może się indukować sygnał zakłócający, niezależny od przetwarzanego prądu. Sygnał zakłócający jest kompensowany za pomocą zwoju powrotnego przechodzącego przez środek karkasu. Przy dużej długości cewki otrzymuje się dobrą kompensację. Sygnał zakłócający pojawia się głównie na skutek niejednorodności rozkładu zwojów na złączu początku i końca cewki Rogowskiego, dlatego należy zwrócić szczególną uwagę na poprawną technikę pomiaru prądu.

Czułość przetwornika indukcyjnego jest proporcjonalna do gęstości zwojów i do powierzchni przekroju poprzecznego jego uzwojenia [3, 4]. W przypadku cewki Rogowskiego zarówno powierzchnia przekroju poprzecznego jak i gęstość uzwojenia są ograniczone. Te parametry można zwiększyć stosując sztywny karkas w postaci zamkniętego pierścienia [1]. Na pierścieniu można nawinąć uzwojenie kilkuwarstwowe. Jeśli warstwy o parzystym numerze będą nawijane powrotnie i liczba warstw będzie parzysta, to pętle utworzone przez warstwy będą się wzajemnie redukować. Redukcja ta jest jednak przybliżona. Pozostaje pętla wypadkowa, w której mogą się indukować sygnały zakłócające od składowych pól zewnętrznych równoległych do osi pierścienia. Sygnały zakłócające mogą być indukowane także przez składowe prostopadłe do osi pierścienia, gdyż na pierścieniu trudno jest wykonać równomiernie rozłożone uzwojenie wielowarstwowe.

Trudności realizacji przetworników indukcyjnych o dużej czułości można uniknąć stosując konstrukcję złożoną z cewek cylindrycznych połączonych magnetowodami ferromagnetycznymi. W artykule przedstawiono zaprojektowane, wykonane i stosowane do badań, modele przetworników ze zworami ferromagnetycznymi i ferrytowymi. Podano wyniki badań liniowości przetwarzania oraz wyniki pomiarów sygnałów zakłócających pochodzących od zewnętrznego przepływu prądu.

2. Cewka cylindryczna

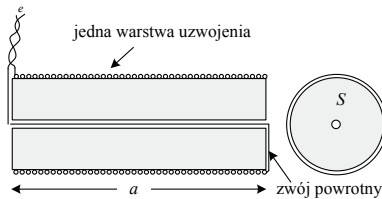
W indukcyjnych przetwornikach prądu sieciowego ze zworami ferromagnetycznymi wykorzystane zostały właściwości cewek cylindrycznych. Uzwojenie cewki cylindrycznej jest prostą operacją technologiczną, umożliwiającą otrzymanie dokładnie równomiernego rozłożenia zwojów. Gęstość uzwojenia ν można więc przyjąć stałą. Jeśli ponadto uzwojenie jest wykonane cienkim drutem ($\varnothing \leq 0,1\text{mm}$) to można także przyjąć, że na elemencie dl długości cewki o elementarnej powierzchni przekroju poprzecznego ds mieści się νdl zwojów. Strumień magnetyczny, pochodzący od pola zewnętrznego, skojarzony z elementarną cewką jest zatem równy

$$d\psi = \mu_0 \nu \left(\int_0^a H_l dl \right) ds = \mu_0 \nu u_\mu ds \quad (1)$$

i jest proporcjonalny do napięcia magnetycznego u_μ występującego w zewnętrznym polu magnetycznym między końcami cewki. Symbol H_l w równaniu (1) oznacza składową natężenia zewnętrznego pola magnetycznego styczną do elementu dl długości cewki. Równanie (1) może być także stosowane dla cewki o dowolnym przekroju poprzecznym, jeśli powierzchnie końców cewki mają stały potencjał magnetyczny.

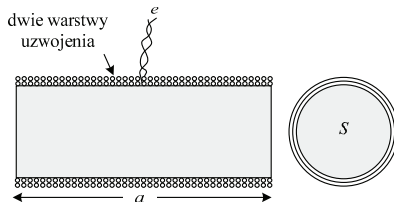
Strumień skojarzony z uzwojeniem cewki pochodzący od składowej natężenia pola zewnętrznego prostopadłej do osi cewki będzie równy zeru, ale tylko przy odpowiednim wyprowadzeniu

końcówek cewki. Uzwojenie cewki i przewody wyprowadzające mogą bowiem tworzyć pętlę, która będzie obejmować strumień niezależny od napięcia magnetycznego między końcami cewki. Odcinek pętli utworzony przez jedną warstwę uzwojenia przebiega wzdłuż osi cewki cylindrycznej niezależnie od jej średnicy. Aby nie tworzyła się pętla, końcówki cewki jednowarstwowej powinny być wyprowadzone przewodami ułożonymi tak, jak na rysunku 1.



Rys. 1. Cewka cylindryczna z jednowarstwowym uzwojeniem
Fig. 1. Single-layer winding cylindrical coil

Jeden z przewodów wraca wzdłuż osi cewki i jest skręcony z drugim przewodem. Jeśli cewka cylindryczna ma parzystą liczbę współosiowych warstw, to odcinki pętli pochodzące od poszczególnych warstw wzajemnie się redukują i nie powstaje pętla wypadkowa. Końcówki cewki o parzystej liczbie warstw znajdują się obok siebie i mogą być wyprowadzone skręconymi przewodami (rys. 2).

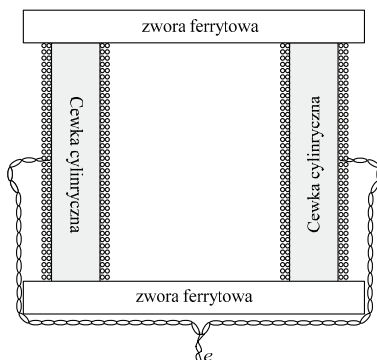


Rys. 2. Cewka cylindryczna z dwuwarstwowym uzwojeniem
Fig. 2. Single-layer winding cylindrical coil

Cewka cylindryczna o parzystej liczbie warstw jest więc odporna na działanie magnetycznych pól zakłócających niezależnych od napięcia magnetycznego między końcami cewki

3. Przetworniki ze zworami

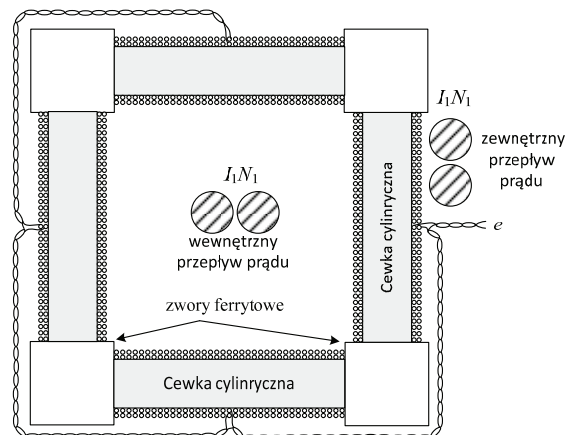
Za pomocą cewek cylindrycznych można zmierzyć napięcie magnetyczne w obwodzie zamkniętym obejmującym przetwarzany przepływ prądu, jeśli powierzchnie końcowe cewek zostaną zwarte przez magnetowody ferromagnetyczne (rys. 3 i 4).



Rys. 3. Indukcyjny przetwornik prądu sieciowego z dwiema zworami i dwiema cewkami cylindrycznymi
Fig. 3. Power line current inductive transducer with two clamps and two cylindrical coils

Powierzchnie końcowe cewek powinny dokładnie przylegać do powierzchni magnetowodów oraz przenikalność magnetowo-

dów powinna być duża, wtedy potencjały magnetyczne na powierzchniach końcowych cewek zostaną wyrównane a spadki napięcia magnetycznego na magnetowodach będą bliskie zeru. Całe napięcie okężne wystąpi więc praktycznie na cewkach. Jeśli ponadto magnetowody zwierające będą krótkie i o dużym przekroju poprzecznym, to spadek napięcia magnetycznego na zworach zmaleje nie tylko na skutek dużej przenikalności i rozmiarów magnetowodów, ale także na skutek dużego współczynnika odmagnesowania.



Rys. 4. Indukcyjny przetwornik prądu sieciowego z czterema zworami i czterema cewkami cylindrycznymi
Fig. 4. Power line current inductive transducer with four clamps and four cylindrical coils

Zwory powodują, że strumień magnetyczny skojarzony z uzwojeniem cewki jest proporcjonalny do napięcia magnetycznego między końcami cewki niezależnie od jej średnicy oraz, że suma napięć magnetycznych na wszystkich cewkach przetwornika będzie równa napięciu okężnemu. Współczynnik przetwarzania M indukcyjnych przetworników prądu składających się z jednakowych cewek cylindrycznych połączonych zworami jest określony przez równania

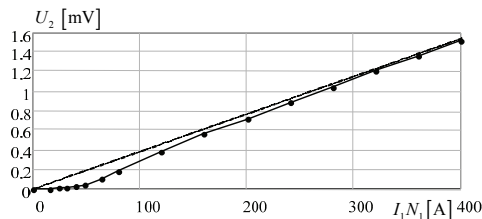
$$\psi = \mu_0 v \left(\int H_i dl \right) S = \mu_0 v i_1 N_1 S, \quad (2)$$

$$\frac{\psi}{i_1} = M = \mu_0 v N_1 S. \quad (3)$$

W równaniach (2) i (3) ψ oznacza strumień magnetyczny skojarzony ze zwojami wszystkich cewek tworzących zamknięty obwód, $i_1 N_1$ oznacza przepływ przetwarzanego prądu, a S – średnią powierzchnię przekroju poprzecznego uzwojenia cewki. Współczynnik przetwarzania zależy tylko od stałych parametrów, a nie zależy ani od konfiguracji obwodu prądowego ani od liczby jednakowych cewek tworzących zamknięty obwód otaczający przetwarzany przepływ prądu.

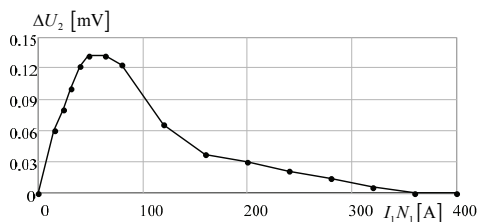
4. Wyniki badań

Wartości parametrów określających jakość przetworników oszacowano na podstawie sygnałów wyjściowych powstających pod wpływem zewnętrznych pól magnetycznych. Na rysunku 5 jest przedstawiona zależność napięcia wyjściowego przetwornika, złożonego z czterech cewek o średnicy 15 mm i długości 30 mm oraz z czterech ferrytowych elementów zwierających, w postaci sześciątów o boku 19,8 mm, od zewnętrznego przepływu prądu. Pole zewnętrzne było generowane przez prąd w wiązce przewodów przylegającej do cewki na zewnątrz przetwornika. Napięcie mierzono woltmierzem uśredniającym bezwzględne wartości chwilowe.

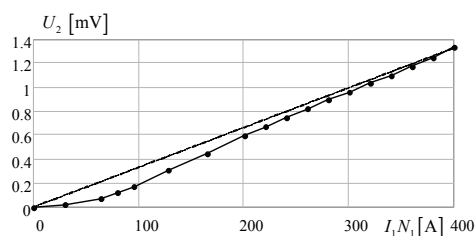


Rys. 5. Zależność napięcia wyjściowego przetwornika, z czterema cewkami i ze zworami ferrytowymi, od zewnętrznego przepływu prądu
Fig. 5. Dependence of the transducer output voltage with four coils and ferrite keeper on the external current flow

Zależność napięcia wyjściowego przetwornika od zewnętrznego przepływu prądu (rys. 5), występuje na skutek spadków napięć magnetycznych spowodowanych przez strumień magnetyczny nie sprzężony z uzwojeniami cewek. Spadki te występują głównie na zworach, ale mogą także wystąpić na styku cewek ze zworami oraz mogą być spowodowane niedoskonałością wykonania cewek. Spadki napięć magnetycznych na zworach powodują, że zależność napięcia wyjściowego od zewnętrznego przepływu prądu jest nieliniowa. Największe odstępstwo od liniowości występuje w zakresie małych wartości prądu, gdzie przenikalność zwory znacznie się zmienia. Jednak kilkakrotny wzrost przenikalności, od przenikalności początkowej do maksymalnej, powoduje wzrost napięcia wyjściowego zaledwie o około 0,14 mV (rys. 6). Ta zmiana napięcia nie wpływa na liniowość przetworzenia prądu, gdyż jest na poziomie rozdzielczości woltomierza mierzącego sygnały wyjściowe, gdy przetwornik obejmuje przepływ prądu I_1N_1 . Dla przepływu prądu $I_1N_1=400$ A na wyjściu badanego przetwornika otrzymano 1,0402V. Błąd przetworzenia prądu przez badany przetwornik, spowodowany przez zewnętrzny przepływ prądu, jest na poziomie 0,2% ($1,45 \text{ mV} / 1,0402 \text{ V} = 0,0014$).



Rys. 6. Zmiana napięcia wyjściowego spowodowana nieliniowością charakterystyki przetwarzania
Fig. 6. Output voltage change caused by the nonlinear processing characteristic

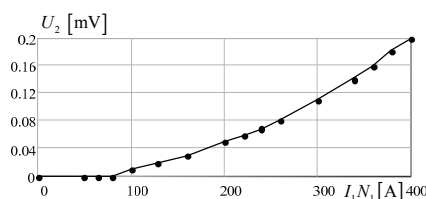


Rys. 7. Zależność napięcia wyjściowego przetwornika, z dwiema cewkami i ze zworami ferrytowymi, od zewnętrznego przepływu prądu
Fig. 7. Dependence of the transducer output voltage with two coils and ferrite keeper on the external current flow

Na rysunku 7 przedstawiona jest zależność napięcia wyjściowego od zewnętrznego przepływu prądu przetwornika, ale nie z czterema, a dwiema cewkami i z dwiema zworami ferrytowymi o wymiarach: długość 80,2 mm, szerokość 19,8 mm, grubość 9,8 mm. Cewki obydwu przetworników były jednakowe.

Zależność przedstawiona na rysunku 7 nie różni się istotnie od zależności przedstawionej na rysunku 5. Napięcie na wyjściu przetwornika z dwiema zworami, przy przetwarzaniu prądu o wartości 400 A, otrzymano równe 1,0243 V, a więc również nieznacznie różniące się od odpowiedniego napięcia wyjściowego przetwornika z czterema cewkami. Wynika stąd, że przetworniki z dwiema i z czterema cewkami mają praktycznie jednakowe właściwości, ale konstrukcja przetwornika z dwiema cewkami jest prostsza i tańsza.

Błąd przetwarzania można znacznie zmniejszyć jeśli zwory przetworników zostaną wykonane z materiałów o dużej przenikalności początkowej; z blachy permalowej lub nanokrystalicznej. Zależność napięcia wyjściowego przetwornika z dwiema cewkami i ze zworami o wymiarach: długość 70 mm, szerokość 20 mm i grubość 6 mm, wykonanymi z pasków blachy permalowej o grubości 0,2 mm, jest przedstawiona na rysunku 8.



Rys. 8. Zależność napięcia wyjściowego przetwornika, z dwiema cewkami i ze zworami permalowymi, od zewnętrznego przepływu prądu
Fig. 8. Dependence of the transducer output voltage with two coils and permalloy keeper on the external current flow

Wartość napięcia wyjściowego przetwornika ze zworami permalowymi dla zewnętrznego przepływu prądu o wartości 400 A wynosiła 0,518 V. Wynika stąd, że błąd przetwarzania tego przetwornika wynosi 0,04%.

5. Wnioski

Przetworniki ze zworami są złożone z cewek cylindrycznych, które dokładnie przetwarzają napięcia magnetyczne występujące między ich końcami i są odporne na działanie składowych pól magnetycznych prostopadłych do osi cewki.

Optymalna konstrukcja przetwornika składa się z dwu cewek połączonych zworami ferrytowymi. Taka konstrukcja jest łatwa do wykonania i tania, a umożliwi osiągnięcie błędu przetwarzania na poziomie 0,1%.

Znacznie mniejszy błąd przetwarzania można osiągnąć stosując zwory wykonane z pasków blachy permalowej lub nanokrystalicznej. Technologia wykonania takiej zwory jest jednak złożona i droga. Konieczne jest szlifowanie powierzchni zwory stykającej się z końcami cewek.

6. Literatura

- [1] Dusza D.: Wpływ zakłóceń od zewnętrznych pól magnetycznych na przetworniki prądu o jednorodnym obwodzie magnetycznym, PAK vol. 57, nr 12/2011, s.1522-1524.
- [2] Bajorek J., Kolas J., Nowak J.: Indukcyjne czujniki prądu, Przegląd Elektrotechniczny, 2007, Nr 1, s. 49-52.
- [3] Nowak J., Bajorek J.: Wyznaczanie wielkości elektromagnetycznych w warunkach pracy obiektu, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Nr 62, 2008, s. 588-596.
- [4] Nowak J., Dusza D.: Czujnik indukcyjny prądu sieciowego o jednorodnym obwodzie magnetycznym, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Nr 64, 2010, s. 436-444.