

Daniel DUSZA

POLITECHNIKA WROCLAWSKA, INSTYTUT MASZYN, NAPEĐÓW I POMIARÓW ELEKTRYCZNYCH
Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław

Wpływ zakłóceń od zewnętrznych pól magnetycznych na przetworniki prądu o jednorodnym obwodzie magnetycznym

Dr inż. Daniel DUSZA

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej, adiunkt w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. 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

Streszczenie

W artykule przedstawiono przetwornik indukcyjny w postaci równomiernie uzwojonego niemagnetycznego rdzenia obejmującego przepływ przetwarzanego prądu, jego właściwości, wyniki badań wpływu zewnętrznych pól magnetycznych na dokładność przetwarzania oraz oryginalny sposób wyznaczenia współczynnika przetwarzania. Wyniki badań wykonanego przetwornika zostały odniesione do wyników uzyskanych z cewki Rogowskiego w wykonaniu fabrycznym. Badania wpływu zakłóceń od zewnętrznych pól magnetycznych pełnią kluczową rolę w ocenie jakości wykonanego przetwornika, a w szczególności możliwa jest ocena niejednorodności nawinięcia uzwojenia wtórnego przetwornika na całym jego obwodzie.

Słowa kluczowe: prąd, przetwarzanie, przetwornik indukcyjny, cewka Rogowskiego.

Influence of disturbance from external magnetic fields on current sensors with homogeneous magnetic circuit

Abstract

The paper deals with an inductive sensor in the form of evenly wound nonmagnetic core including processed current flow (Fig. 1), its properties and research results of the influence of external magnetic fields (Fig. 3) on the processing accuracy. Moreover, the original method for determining the processing factor M (relation (11)) and its measurement with using the loop in \bar{E}, U coordinates for an inductive sensor (Fig. 2a) and for the Rogowski coil (Fig. 2b) are presented. The loop area was determined with use of the estimator described by relation (12). The research results of the constructed sensor (14) were compared with those for the mass produced Rogowski coil (15). The sensor output signal is exactly proportional to the derivative of the current, and the proportionality factor M is constant for any current values. Investigations of the influence of disturbances from external magnetic fields play a key role in the quality assessment of the constructed sensor (measured maximum value is 0.4%, in comparison to 2% of Rogowski coil), in particular the possibility of assessing the sensor secondary winding heterogeneity along the whole circuit.

Keywords: current, processing, current sensor, Rogowski coil.

1. Wprowadzenie

Energia w systemie elektroenergetycznym jest przenoszona przez prąd w przewodach, których potencjały znacznie różnią się od potencjału zerowego. Przetwornik prądu sieciowego musi więc przede wszystkim zapewnić izolację galwaniczną obwodu sygnałowego od obwodu prądowego, co jest niezbędne w systemach pomiarowych. 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. Błąd przetwarzania 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. W celu ograniczenia wpływu prądu polaryzacji budowane są przekładniki dwurdzeniowe. Przekładnik prądowy ma jednak ograniczony zakres liniowości, wąskie pasmo przenoszonych częstotliwości oraz nie przenosi informacji pomiarowej o składowej stałej prądu.

W przetworniku indukcyjnym obwody są sprzężone przez strumień magnetyczny proporcjonalny do przetwarzanego prądu. Sygnał indukowany w obwodzie wyjściowym przetwornika jest 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 giętkiej cewki Rogowskiego [1], którą można objąć przewodem wiodące prąd. Cewka Rogowskiego nie zapewnia jednak równomiernego rozłożenia zwojów na zamkniętym obwodzie, co powoduje, że w uzwojeniu mogą się indukować obce sygnały pochodzące od pól zakłócających. W niniejszej pracy przedstawiono badania przetwornika indukcyjnego w postaci sztywnego zamkniętego pierścienia odniesione do wyników badań typowego rozwiązania cewki Rogowskiego. Przetwornik ten charakteryzuje się większą dokładnością przetwarzania, ale przy jego instalowaniu konieczne jest przerwanie obwodu przetwarzanego prądu.

2. Konstrukcja przetwornika

Na pierścieniu niemagnetycznym o stałym przekroju poprzecznym i wymiarach: średnica wewnętrzna $d_1 = 80$ mm, średnica zewnętrzna $d_2 = 2d_1$, powierzchnia przekroju poprzecznego $S \cong 1500$ mm² (rys. 1) nawinięto równomiernie dwie warstwy posrebrzonego drutu $\phi 0,3$ mm w izolacji teflonowej. Pierwsza warstwa jest nawinięta tak, aby zwoje ściśle wypełniały wewnętrzny obwód rdzenia, dwukrotnie krótszy od obwodu zewnętrznego. Druga warstwa jest nawinięta poskokiem przeciwnym oraz tak, aby zwoje wypełniały odstępy na obwodzie zewnętrznym. W ten sposób na obwodzie zewnętrznym powstała jedna wypełniona warstwa, a na obwodzie wewnętrznym – dwie. Całkowita liczba zwojów $N_2 = 1000$.

Pole magnetyczne wytworzone przez prąd jest wirowe. Jego natężenie spełnia podstawowe równanie

$$\oint H_l dl = i_1 N_1, \quad (1)$$

gdzie H_l jest składową natężenia pola styczną do zamkniętej drogi obejmującej N_1 zwojów wiodących jednakowy prąd i_1 . Strumień magnetyczny pochodzący od natężenia pola H_l i skojarzony z uzwojeniem przetwornika o liczbie zwojów N_2 jest proporcjonalny do prądu i_1

$$\psi = M i_1, \quad (2)$$

a współczynnik przetwarzania wynosi [2]

$$M = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{2\pi} \int_{y_1}^{y_2} \ln \frac{r_2(y)}{r_1(y)} dy. \quad (3)$$

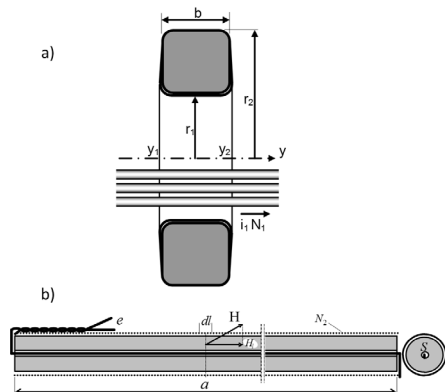
Funkcje $r_1(y)$ i $r_2(y)$ opisują obwiednię przekroju poprzecznego przetwornika. W przypadku, gdy przekrój jest prostokątem o szerokości b (rys. 1a), to

$$M = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{2\pi} b \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (4)$$

Dla cewki Rogowskiego (rys. 1b) obejmującej przepływ prądu $i_1 N_1$ współczynnik przetwarzania określa w przybliżeniu równanie

$$M = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{a} S. \quad (5)$$

Jak wynika z równań (4) i (5) współczynnik przetwarzania zależy tylko od stałych parametrów, nie zależy natomiast od konfiguracji obwodu prądowego, ani od zewnętrznych pól magnetycznych.



Rys. 1. Przetwornik indukcyjny o jednorodnym obwodzie magnetycznym
Fig.1. Homogeneous magnetic circuit inductive sensor

Na wrażliwość przetwornika na zewnętrzne pola magnetyczne wpływa jednak równomierność rozłożenia zwojów N_2 na obwodzie pierścienia oraz skompensowanie napięć występujących na wypadkowych pętach, jakie tworzą poszczególne warstwy uzwojenia przetwornika. Jeśli ponadto są równomiernie rozłożone zwoje pierwotne, to wytwarzane przez prąd i_1 natężenie pola magnetycznego jest w przybliżeniu prostopadłe do powierzchni obejmowanej przez zwoje wtórne, a więc składowa natężenia pola elektrycznego prostopadła do zwojów jest bliska zero, co znacznie zmniejsza wpływ pojemności międzyzwojowej na dokładność przetwarzania.

Przy stałej gęstości uzwojenia $\nu = N_2 / 2\pi r_2$ równanie (4) przyjmuje postać

$$M = \mu_0 \nu N_1 r_2 b \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (6)$$

Z równania (6) wynika, że współczynnik przetwarzania, a więc i czułość przetworników o większym przekroju jest większa. Przybliżona wartość współczynnika przetwarzania przetwornika o podanych wyżej parametrach i przy założeniu, że $N_1 = 1$ oraz przy założeniu, że przekrój przetwornika jest kwadratem o boku 40 mm, wynosi $M \cong 5,54 \mu\text{H}$. Poprawną wartość współczynnika przetwarzania otrzymuje się metodą pomiarową.

3. Pomiar współczynnika przetwarzania

Na podstawie sygnału wyjściowego z przetwornika

$$e_2 = -M \frac{di_1}{dt}, \quad (7)$$

można wyznaczyć ciąg wartości chwilowych prądu i_{1k} , mierząc wartość średnią wycinanych fragmentów sygnału od wybieranych chwil t_k do chwil po półokresie $t_k + T/2$ [3]

$$\bar{E}_k = \frac{1}{T_c} \int_{t_k}^{t_k+T/2} e_2 dt = \frac{2M}{T_c} i_1(t_k), \quad (8)$$

gdzie $T_c \geq T$ – czas uśredniania (całkowania). Równanie (8) jest słuszne przy założeniu, że przebieg prądu i_1 jest antysymetryczny względem osi odciętych, czyli gdy

$$i_1(t_k) = -i_1(t_k + T/2). \quad (9)$$

Jeśli ponadto prąd i_1 występuje w obwodzie izolowanym galwanicznie, to w podobny sposób można synchronicznie wyznaczyć ciąg wartości chwilowych ładunku, mierząc wartość średnią wycinanych półokresowych fragmentów spadku napięcia spowodowanego przez prąd i_1 na rezystorze R

$$\bar{U}_k = \frac{2R}{T_c} q_1(t_k). \quad (10)$$

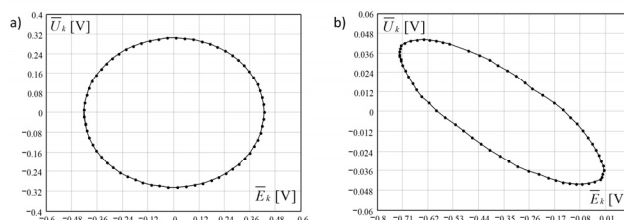
Ciągi wartości średnich \bar{E}_k i \bar{U}_k tworzą we współrzędnych \bar{E} , \bar{U} pętlę. Do powierzchni tej pętli jest proporcjonalny kwadrat wartości skutecznej prądu i_1

$$I_1^2 = \frac{T_c^2}{4MRT} A_{\bar{E}, \bar{U}}. \quad (11)$$

Powierzchnię $A_{\bar{E}, \bar{U}}$ wyznaczono za pomocą estymatora

$$A_{\bar{E}, \bar{U}} = \sum_{k=1}^{n-1} (\bar{U}_{k+1} - \bar{U}_k) \frac{\bar{E}_k + \bar{E}_{k+1}}{2} + (\bar{U}_1 - \bar{U}_n) \frac{\bar{E}_1 + \bar{E}_n}{2}, \quad (12)$$

który nie wymaga, aby pomiary były dokładnie rozłożone w okresie.



Rys. 2. Pętla utworzona przez ciąg par wartości \bar{E}_k, \bar{U}_k
a) dla przetwornika indukcyjnego, b) dla cewki Rogowskiego

Fig. 2. Loop formed by the sequence steam value of \bar{E}_k, \bar{U}_k for
a) inductive sensor, b) Rogowski coil

Ponadto powierzchnia pętli nie zależy od składowych stałych, które mogą się pojawić w wyniku przetwarzania sygnałów, a przebieg pętli może być wyznaczony nawet przy niewielkich fluktuacjach prądu sieciowego. Współczynnik przetwarzania M otrzymuje się z równania (11) na podstawie wyznaczonej powierzchni pętli ze wzoru (12) i zmierzonej wartości skutecznej prądu. Układ pomiarowy [4] ma trzy tory pomiarowe działające synchronicznie. Jednocześnie są wyzwalane pomiary: wartości średniej sygnału proporcjonalnej do wartości chwilowej prądu, wartości średniej spadku napięcia na rezystorze R proporcjonalnej do wartości chwilowej ładunku oraz wartości skutecznej spadku napięcia na rezystorze R proporcjonalnej do wartości skutecznej prądu. Kwadrat wartości skutecznej prądu wyznaczony na podstawie powierzchni pętli jest wielkością uśrednioną. Należy ją zatem porównywać z kwadratem również uśrednionej zmierzonej wartości skutecznej prądu. Równanie (11) przyjmie wtedy postać

$$\left(\frac{1}{nR} \sum_{k=1}^n U_{3k} \right)^2 = \frac{T_c^2}{4MRT} A_{E,\bar{U}} \cdot \quad (13)$$

Wyznaczona na podstawie równania (13) poprawna wartość współczynnika przetwarzania dla przetwornika o sztywnej konstrukcji, odniesiona do jednego zwoju uzwojenia pierwotnego, wynosi

$$\frac{M}{N_1} = (5,034 \pm 0,003) \mu\text{H}, \quad (14)$$

natomiast dla cewki Rogowskiego wartość współczynnika przetwarzania jest znacznie mniejsza i wynosi

$$\frac{M}{N_1} = (0,791 \pm 0,015) \mu\text{H}. \quad (15)$$

Niepewność wyznaczenia tych wartości została oszacowana na podstawie powtarzalności wyników pomiarów.

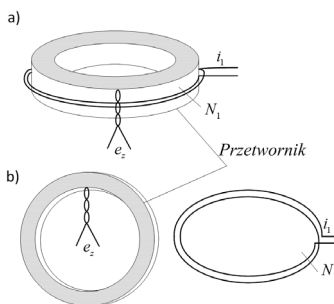
4. Wpływ zakłóceń

Niepewność przetwarzania prądu pochodzi głównie od zewnętrznych pól magnetycznych, które indukują w uzwojeniu przetwornika dodatkowe sygnały. Działające na przetwornik pola zewnętrzne różnią się od pola wirowego wytwarzanego przez przetwarzany prąd, są bowiem potencjalne w przestrzeni przetwornika. Sygnały pochodzące od pól zewnętrznych nie kompensują się z powodu niedoskonałej symetrii przetwornika.

Względny poziom sygnału zakłócającego został określony na podstawie ilorazu zmierzonej wartości średniej sygnału na wyjściu przetwornika w przypadku, gdy przetwornik ten nie obejmował przepływu prądu $i_1 \cdot N_1$ i zmierzonej wartości średniej sygnału w przypadku, gdy czujnik obejmował taki sam przepływ prądu $i_1 \cdot N_1$

$$\delta_z = \frac{\langle |e_z| \rangle}{\langle |e_2| \rangle}. \quad (16)$$

Sygnał zakłócający, przy położeniu przetwornika względem pola zewnętrznego jak na rysunku 3a, powstaje głównie na skutek niekompensowania się napięć indukujących się w pętłach utworzonych przez poszczególne warstwy uzwojenia. W przetworniku pierścieniowym pełnej kompensacji tych pętli nie da się osiągnąć.



Rys. 3. Położenie przetwornika względem zewnętrznego źródła pola magnetycznego
Fig. 3. Inductive sensor position in relation to external source of magnetic field

Dla wykonanego egzemplarza przetwornika otrzymano

$$\delta_{z(a)} = 2,2\%, \quad (17)$$

natomiast dla cewki Rogowskiego analogiczna wartość wynosi

$$\delta_{z(a)} = 1,8\%. \quad (18)$$

Sygnał zakłócający, przy położeniu przetwornika względem pola zakłócającego jak na rysunku 3b, powstaje na skutek nierównomiernego rozłożenia zwojów. Największa jego wartość występuje wtedy, gdy największa nierównomierność znajdzie się w polu o dużym gradientcie. Dla wykonanego egzemplarza przetwornika otrzymano

$$\delta_{z(b)\max} = 0,4\%, \quad (19)$$

natomiast dla cewki Rogowskiego

$$\delta_{z(b)\max} = 2,0\%. \quad (20)$$

Niepewność wyniku przetworzenia spowodowana działaniem pól zewnętrznych powstaje głównie na skutek niekompensowania się wypadkowych pętli utworzonych przez poszczególne warstwy pierścieniowego czujnika. Wpływ zakłóceń pochodzących od pól zewnętrznych szybko maleje, gdy źródła pola oddalają się od przetwornika.

5. Wnioski

Przetwornik indukcyjny przetwarza prąd na sygnał napięciowy indukowany w obwodzie izolowanym galwanicznie od obwodu prądowego. Sygnał jest proporcjonalny do pochodnej prądu, a współczynnik proporcjonalności jest stały dla dowolnych wartości prądów. Różniczkowa zależność sygnału od prądu powoduje, że dla odtworzenia prądu potrzebna jest realizacja operacji całkowania lub uśredniania oraz uwzględnienie warunku początkowego.

Poszczególne warstwy uzwojenia przetwornika o jednorodnym obwodzie magnetycznym tworzą wypadkowe pętli, których napięcie nie da się w pełni skompensować. W tych pętlach może się indukować sygnał niezależny od przetwarzanego prądu. Wartość tego sygnału może stanowić około 2,2% sygnału użytecznego, jeśli na czujnik wzdłuż jego osi będzie działać pole pochodzące od źródła o przepływie równym przepływowi przetwarzanego prądu. Dla cewki Rogowskiego (rys.3a) sygnał zakłócający pochodzący od nieskompensowania pętli jest mniejszy. Jest to spowodowane tym, że promień krzywizny cewki Rogowskiego jest znacznie większy od średnicy jej przekroju poprzecznego. Wraz z oddalaniem się zewnętrznego pola magnetycznego, wartości sygnałów błędów zmniejszają się.

W uzwojeniu przetwornika mogą się również indukować sygnały pochodzące od pól zewnętrznych działających prostopadle do osi przetwornika, jeśli zwoje nie są doskonale równomiernie rozłożone. W wykonanym egzemplarzu przetwornika maksymalna wartość tego sygnału (rys. 3b) stanowiła 0,4% sygnału użytecznego pochodzącego od takiej samej wartości przepływu, jak sygnał zakłócający, natomiast w przypadku przemysłowego wykonania cewki Rogowskiego wartość ta wzrosła do 2,0% przy złączeniu. Badania wpływu zewnętrznych pól magnetycznych na poprawność wyników pomiarów są wskaźnikiem jakości wykonanych przetworników.

6. Literatura

- [1] Nowak J.: Przetwarzanie wielkości charakteryzujących pole magnetyczne (str.21-22), Oficyna Wydawnicza Pol. Wr., Wrocław, 2005.
- [2] Bajorek J., Kolasa 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.

otrzymano / received: 16.09.2011

przyjęto do druku / accepted: 02.11.2011

artykuł recenzowany