

Metoda indukcyjna pomiaru składowej stałej prądu sieciowego

Streszczenie. Metoda indukcyjna pomiaru składowej stałej prądu sieciowego opiera się o wykorzystanie sygnałów z komparatora magnetycznego, oraz z cewki Rogowskiego. Dla wyznaczenia składowej stałej prądu sieciowego za pomocą cewki Rogowskiego wymagana jest znajomość warunku początkowego całkowania, czyli przejścia prądu przez wartość zerową. Pokazano, że potrzebna jest informacja pomiarowa z obu przejść prądu przez zero w celu prawidłowej detekcji wartości składowej stałej prądu. Przedstawiono właściwości metody, układ pomiarowy oraz przykładowe wyniki badań opracowanego układu do pomiaru małych wartości prądu stałego występującego w dużych wartościach prądu przemiennego.

Abstract. An inductive method of DC current component measurement is based on the use of signals from a magnetic comparator and Rogowski coil. To determine DC component of the current using a Rogowski coil, it is required to know the initial integration condition – when the current passing through the zero. It has been shown that signals are needed from both current transitions through zero to correctly detect the DC current component. The properties of the method, measurement circuit and test results of the method are presented. (**Inductive method of DC current component measurement**).

Słowa kluczowe: prąd, składowa stała, komparator magnetyczny, przejście przez zero.

Keywords: current, DC current bias, magnetic comparator, zero crossing.

Wstęp

Prąd sieciowy jest przetwarzany na sygnały pomiarowe głównie za pomocą przekładników prądowych i przetworników indukcyjnych [1, 2, 3]. Te metody zapewniają naturalną izolację galwaniczną obwodów wyjściowych od obwodu prądowego, którego potencjał może być znacznie wyższy od zerowego i nie może być przeniesiony na przyrządy pomiarowe.

Prąd wyjściowy przekładników, podobnie jak sygnały wyjściowe z przetworników indukcyjnych, nie zawierają informacji o składowej stałej prądu. Do pomiaru składowej stałej prądu sieciowego trzeba stosować oddzielne metody. Jedną z takich metod jest zastosowanie przekładników pracujących w pętli zamkniętej z czujnikiem Halla [4], jednak to rozwiązanie powoduje powstanie przesunięcia fazowego uzależnionego od wartości częstotliwości mierzonego sygnału.

Występowanie składowej stałej prądu w sieci elektroenergetycznej staje się coraz poważniejszym zagadnieniem w sytuacji, kiedy występuje coraz więcej rozproszonych źródeł energii małej mocy. Urządzenia wytwarzające lokalnie energię elektryczną, lecz podłączone do systemu elektroenergetycznego, są to zazwyczaj urządzenia produkujące energię z odnawialnych źródeł energii. W wyniku procesu wytwarzania energii z tych źródeł do sieci elektroenergetycznej może być dostarczana składowa stała prądu o niewielkiej wartości, ale powodująca występowanie niekorzystnych zjawisk, między innymi skutkuje zwiększeniem temperatury pracy transformatorów energetycznych. Z artykułów [5, 6, 7, 8, 9] wynika, że nawet bardzo niewielki udział procentowy składowej stałej prądu wpływa bardzo znacząco na czas eksploatacji, a może doprowadzić do wystąpienia awarii. Istniejące przetworniki mierzą w zakresie od DC, ale w zakresie małych wartości prądów. Pierwszą próbę podejścia do tematu podjęła firma ABB [10] Zastosowane rozwiązanie uwzględnia wykorzystanie czujnika Halla, czyli rozwiązania znanego z przetworników dla małych wartości prądów oraz uzwojenia kompensującego dużą wartość składowej AC. W poniższym artykule autor wykorzystuje komparator magnetyczny w celu wyznaczenia chwil czasowych, w których prąd przechodzi przez wartość zerową a następnie z wykorzystaniem cewki Rogowskiego (indukcyjności wzajemnej) oraz algorytmu obliczeniowego wyznaczenie wartości prądu stałego o małej wartości występującego w otoczeniu prądu o częstotliwości sieciowej o dużej wartości. Stosunek składowej DC do składowej AC

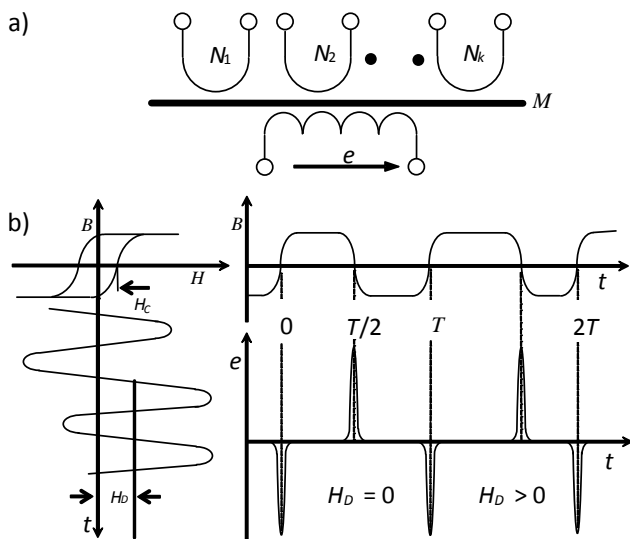
jest bardzo mały, tzn. wynosi nawet 1:5000. Znając zatem wartość indukcyjności wzajemnej przetwornika prądu [11] oraz warunku początkowego możliwe jest wykrywanie i pomiar składowej prądu DC występującej w sieci elektroenergetycznej

Komparator magnetyczny

Komparator magnetyczny jest rdzeniem o dużej przenikalności magnetycznej. Na rdzeniu nawinięte są uzwojenia dla przepływów prądów komparowanych ($N_1, N_2 \dots N_k$) i uzwojenie, w którym indukuje się sygnał wyjściowy e (rys. 1a). Dla wyznaczenia składowej stałej prądu wymagane jest przejście prądu przez wartość zerową. Wystarczy więc tylko jedno uzwojenie prądowe. Zwykle jest to jeden przewód objęty przez rdzeń. Indukowany w uzwojeniu wyjściowym sygnał może być małej mocy. Rdzeń może więc mieć mały przekrój poprzeczny. Jest to korzystne, gdyż zakłócenia prądu pierwotnego w czasie przełączania komparatora mogą być pominięte.

Jeśli przepływ prądu jest okresowy i wytwarza natężenie pola magnetycznego H_D większe od bezwzględnych wartości koercji H_C , to indukcja w rdzeniu zmienia stany nasycenia. W czasie przejść od nasycenia minus do nasycenia plus powstaje impuls ujemny, a w czasie przejścia od nasycenia plus do nasycenia minus – impuls dodatni. (rys.1b). Kierunek przejścia indukcji między stanami nasycenia jest zgodny z kierunkiem przejścia prądu przez zero. Szczytowe wartości impulsów występują w chwilach, gdy natężenie pola jest równe koercji. Na skutek histerezy rdzenia wartości szczytowe impulsów są opóźnione względem przejścia prądu przez zero

Jeśli proporcjonalny do prądu przebieg natężenia pola magnetycznego jest symetryczny i nie zawiera składowej stałej, to na przykład impulsy dodatnie są symetrycznie położone względem impulsów ujemnych ($H_D=0$). Składowa stała natężenia pola powoduje przesunięcie impulsów dodatnich względem impulsów ujemnych. Kierunek przesunięcia zależy od polaryzacji składowej stałej natężenia pola. Jeśli proporcjonalna do prądu składowa stała natężenia pola jest dodatnia ($H_D>0$), to impulsy dodatnie przesuwają się w kierunku rosnących wartości na osi czasu. Impulsy indukują się w uzwojeniu izolowanym galwanicznie od obwodu prądowego podobnie jak w przetworniku indukcyjnym (cewce Rogowskiego) i przekładniku prądowym.



Rys. 1. Komparator magnetyczny: a – schemat komparatora, b – przykładowe przebiegi wielkości w komparatorze, H_c – natężenie koercyjnego, H_b – natężenie pola magnetycznego.

Właściwości metody

Dokładne odwzorzenie składowych zmiennych prądu otrzymuje się za pomocą przetwornika indukcyjnego. Napięcie na wyjściu przetwornika indukcyjnego zależy od przetwarzanego prądu i_1 według równania

$$(1) \quad e = -M \frac{di_1}{dt},$$

gdzie M jest stałym współczynnikiem – indukcyjnością wzajemną.

Z równania (1) można wyznaczyć prąd i_1 z dokładnością do stałej i_0

$$(2) \quad i_1 = -\frac{1}{M} \int e dt + i_0.$$

Prąd sieciowy i_1 jest okresowy. Okresowy jest również przebieg napięcia e . Średnia wartość prądu i_1 w okresie jest równa i_0 . Prąd i_0 jest więc składową stałą prądu i_1 . Prąd i_2 wyznaczony na podstawie napięcia e odtwarza przebieg prądu i_1 , ale nie zawiera składowej stałej. Przebieg prądu i_2 zależy więc od przebiegu prądu i_1 według równania

$$(3) \quad i(t)_1 = ki(t)_2 + i_0,$$

gdzie k – współczynnik przetwarzania prądu i_1 .

Jeśli zostanie wyznaczona chwila t_0 , w której prąd i_1 przechodzi przez zero, to

$$(4) \quad i_0 = -ki(t_0)_2.$$

Wartości chwilowe prądu i_2 otrzymuje się całkując cyfrowo indukowane napięcie e .

Równanie (4) jest spełnione dla dowolnych przebiegów okresowych prądu przechodzących przez zero. W warunkach rzeczywistych chwile przejścia prądu przez zero można wyznaczyć w przybliżeniu. Jeśli przyjmie się, że prąd i_1 przechodzi przez zero w chwili, gdy impulsy z komparatora magnetycznego osiągają wartości szczytowe, to wyznaczony przebieg prądu i_2 będzie opóźniony (przesunięty w fazie) względem przebiegu prądu i_1 . Pomiar prądu i_2 może być wyzwany, gdy na narastającym zboczach impulsu zostanie przekroczony ustawiony poziom napięcia. Przesunięcie fazy prądu i_2 zależy więc od ustawionego poziomu napięcia i szerokości impulsu na tym poziomie. Ponadto przesunięcie fazy zmienia się, gdyż wartość

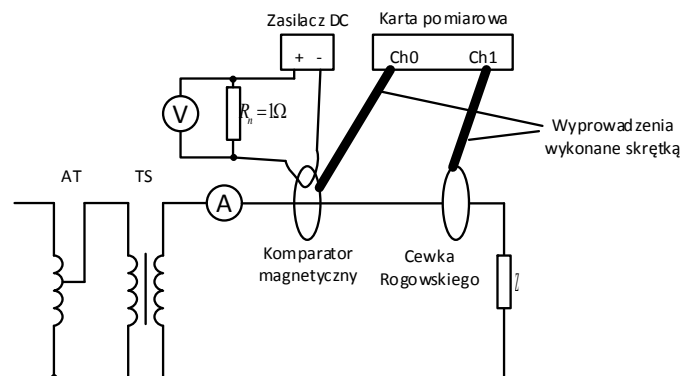
przekroczenia poziomu napięcia jest przypadkowa, spowodowana błędem dyskretyzacji pomiaru cyfrowego. Na skutek przesunięcia fazowego pomiar wartości chwilowej prądu i_2 w chwili przejścia prądu i_1 przez zero jest błędny. Błąd systematyczny można skompensować jeśli zostaną wykorzystane dwa kolejne impulsy. Wartość średnia dwóch kolejnych wartości chwilowych prądu i_2 jest równa składowej stałej niezależnie od przesunięcia fazowego jeśli przebieg prądu i_1 nie zawiera parzystych harmonicznych. Przypadkowe zmiany przesunięcia fazowego nie kompensują się. Ich wpływ można badać przez wielokrotne wykonanie pomiaru.

Jeśli przebieg prądu i_1 zawiera parzyste harmoniczne, to przesunięcie fazowe wpływa na wynik pomiaru składowej stałej, ale tylko wtedy, gdy dodatnia część przebiegu prądu nie jest symetryczna i/lub ujemna część przebiegu prądu nie jest symetryczna. Wpływ ten nie zależy jednak od składowej stałej. Od szybkości przejścia prądu przez zero zależy na skutek zmiany szerokości pętli histerezy rdzenia komparatora magnetycznego

Znak wyniku pomiaru składowej stałej zmienia się przy zamianie końcówek uzwojenia wejściowego lub wyjściowego komparatora magnetycznego. Znak zmienia się także przy zamianie końcówek uzwojenia wejściowego lub wyjściowego przetwornika indukcyjnego. Aby określić znak jednoznacznie, według definicji, trzeba zobaczyć jaka jest relacja znaku impulsu i kierunku przejścia prądu i_2 przez zero. Jeśli znak impulsu jest dodatni, a prąd przechodzi przez zero od wartości dodatnich do ujemnych, to faza prądu i_2 jest zgodna z fazą prądu i_1 . Znak zmierzonej składowej stałej jest wtedy przeciwny do znaku zdefiniowanego (4). Przy innej relacji znaki są zgodne. Przez zmianę znaku mierzonej składowej stałej można stwierdzić czy istnieje wpływ parzystych harmonicznych. Jeśli istnieje, to wystąpi różnica wartości bezwzględnych mierzonej składowej stałej. Niezależna od parzystych harmonicznych jest średnia wartości bezwzględnych zmierzonej składowej stałej przy różnych znakach.

Stanowisko pomiarowe

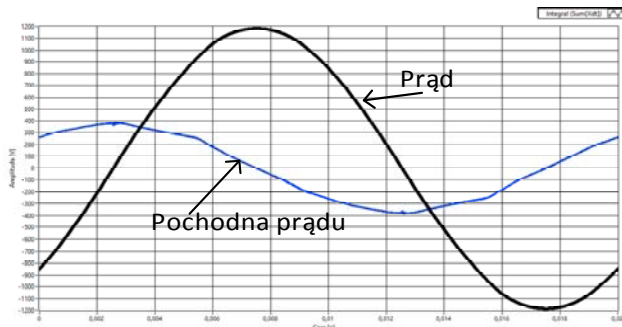
Sygnal mierzony, tak jak pokazano na rysunku 2, pobierany jest z transformatora separującego TS, na którym nawinięto dodatkowe uzwojenie i uzyskano wymuszenie prądowe na poziomie 5 A. Wartość prądu jest zmieniana poprzez nastawę autotransformatora AT i mierzona jest amperomierzem wartości skutecznej A.



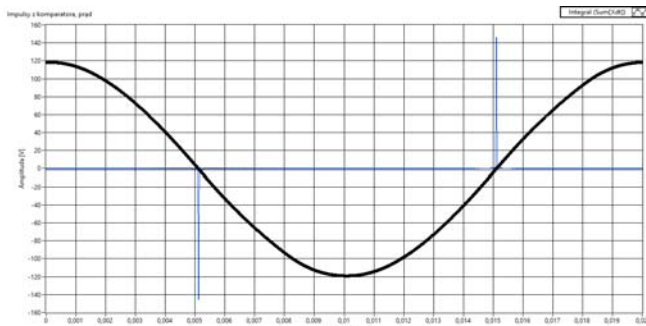
Rys. 2. Schemat układu pomiarowego.

Przewód wiodący prąd jest następnie nawinięty na komparatorze magnetycznym zapewniając odpowiednio dużą wartość przepływu. Ponadto przez okno komparatora przechodzi oddzielny przewód z zasilacza napięcia stałego symulujący obecność prądu w sygnale sieciowym. Wartość prądu stałego mierzona jest metodą pośrednią

z zastosowaniem opornika wzorcowego $R_N=1 \Omega$. Kolejnym elementem składowym układu pomiarowego jest indukcyjny przetwornik prądu (cewka Rogowskiego) na wyjściu której otrzymano sygnał proporcjonalny do pochodnej prądu sieciowego bez zawartości składowej stałej. Impedancja Z stanowi obciążenie i jednocześnie filtr, dzięki czemu otrzymano przebieg zbliżony do sinusoidalnego (rys. 3). Sygnały wyjściowe z komparatora (na rys.4 wzmocnione cyfrowo 100 razy) oraz cewki Rogowskiego zostały doprowadzone do karty pomiarowej NI USB6356, która zawiera równoległe tory przetwarzania sygnału mierzonego.

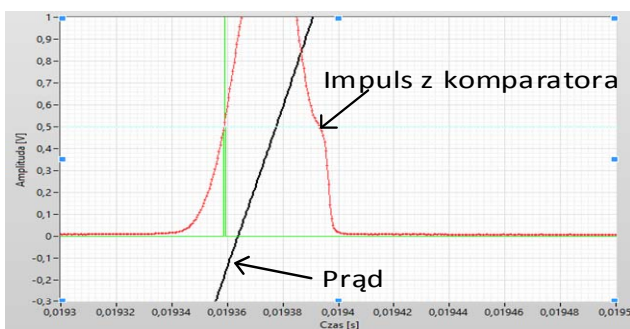


Rys. 3. Przebieg prądu sieciowego oraz jego pochodna

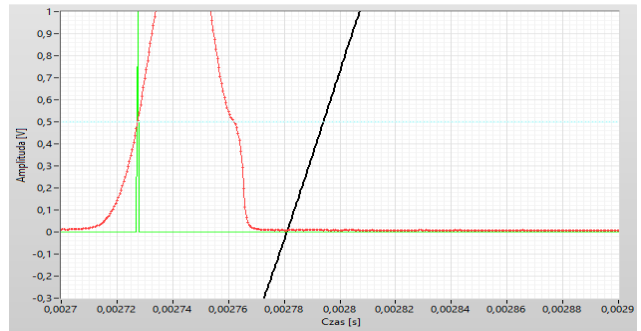


Rys. 4. Impulsy z komparatora magnetycznego

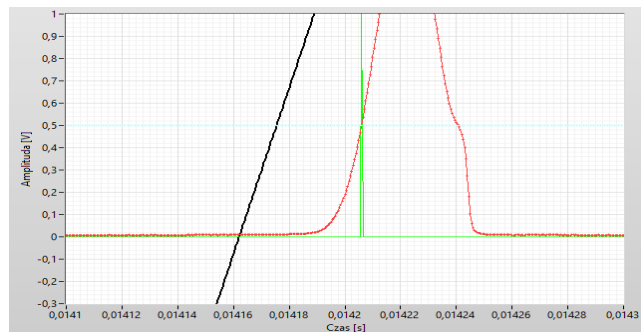
Na rysunkach 5, 6 i 7 pokazano w znacznym powiększeniu zmierzone sekwencje dla komparatora magnetycznego oraz prądu sieciowego dla zbocza opadającego (linia prosta). Sytuację, kiedy prąd I_{DC} ma wartość zero obrazuje rysunek 5. Na rysunku 6 zobrazowano sekwencję dla prądu $I_{DC}=1 \text{ A}$, a na rysunku 7 dla prądu $I_{DC}=-1 \text{ A}$. Na rysunkach 5, 6 i 7 przebieg czarny jest fragmentem przebiegu prądu, kolorem czerwonym oznaczono impuls z generatora, kolor zielony daje informacje o chwili czasowej, w której pobierana jest odpowiednia próbka prądu, która określona jest w poniższym przypadku poziomem wyzwolenia równym $0,5 \text{ V}$.



Rys. 5. Położenie i kształt impulsu z komparatora magnetycznego dla prądu $I_{DC}=0$



Rys. 6. Położenie i kształt impulsu z komparatora magnetycznego dla prądu $I_{DC}=+1 \text{ A}$



Rys. 7. Położenie i kształt impulsu z komparatora magnetycznego dla prądu $I_{DC}=-1 \text{ A}$

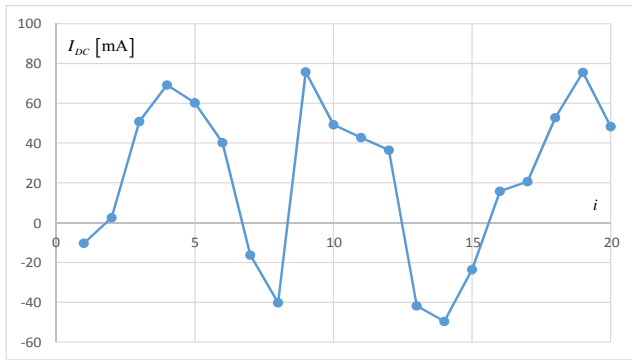
Wyniki Badań

Badania wykonano zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2. Ponieważ zaobserwowano silny wpływ przypadkowych zmian wartości mierzonych przesunięcia fazowego na wynik pomiaru, to podjęto próbę minimalizacji tego wpływu poprzez uśrednienie wartości wyniku pomiaru prądu stałego z N zmierzonych wartości. Pomiary wykonano dla $N=20$, $N=50$, $N=200$ i $N=500$. Dla warunków laboratoryjnych, gdzie wartość sygnału stałego doprowadzono z zasilacza stabilizowanego o dużej stałości, przy przepływie prądu zmiennego przez komparator na poziomie 100 A , pomiar składowej stałej został oceniony na poprawny dla wszystkich wartości mierzonych prądu. Otrzymane wyniki zmierzonego prądu zmierzono w mA i przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zmierzone wartości prądu stałego dla różnych wartości tego prądu oraz różnych wartości N .

$I_{DC} [\text{mA}] / N$	20	50	200	500
20,6	22,9	21,4	20,2	20,3
39,7	42,8	42,3	40,8	40,2
80,2	78,9	81,2	80,7	80,5
120,4	121,2	119,7	120,9	120,9
200,6	199,8	200,1	200,9	200,8
499,8	498,5	499,2	499,6	499,6
1000,5	999,8	1000,1	1000,8	1000,6

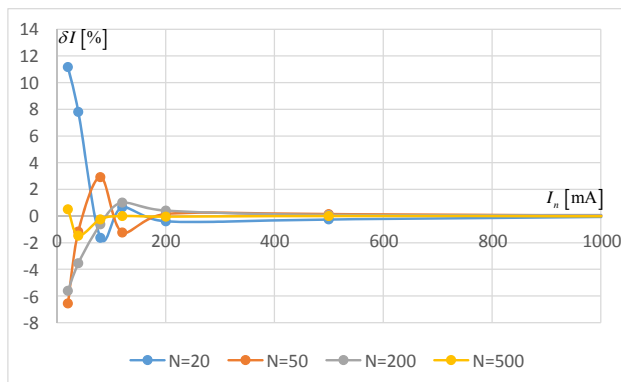
Na rysunku 8 pokazano przykładowe zmiany wartości pojedynczych pomiarów dla prądu $I_{DC}=20,6 \text{ mA}$ i dla $N=20$ pomiarów. Jak wynika z poniższego rysunku zmiany i -tego pomiaru przesunięcia fazowego są znaczne, ale mają również przeciwne znaki. Spełniają zatem kryterium występowania błędów przypadkowych i po uśrednieniu uzyskuje się wartości mierzone zbliżone do wartości poprawnych [12].



Rys. 8. Wartości przypadkowych zmian wartości mierzonych podczas pomiaru I_{DC} .

Na rysunku 9 pokazano względną zmianę pomiaru składowej stałej prądu w zależności od liczby pomiarów N wykorzystywanych do wyznaczenia wartości średniej oraz od wartości tego prądu. Wartość tą wyznaczono na podstawie definicji błędu względnego.

Otrzymany wynik wskazuje jednoznacznie, że dla małego udziału składowej stałej w prądzie sieciowym, efekt od błędów przypadkowych jest większy co wymusza konieczność zwiększenia liczby powtórzeń do $N=200$. Dalszy wzrost powtórzeń pomiaru nie daje już wymiernego efektu.



Rys. 9. Względna zmiana pomiaru dla różnych wartości N oraz mierzonego prądu I_{DC} przy przepływie prądu $I_{AC}=100$ A

Ocena niepewności

Głównym składnikiem niepewności pomiarowej w zaprezentowanej metodzie jest niepewność typu A spowodowana efektami przypadkowymi. Niepewność oszacowano wykonując 10 pomiarów z wartości uśrednionych dla $N=200$. Niepewność względną wyznaczenia poprawnej wartości prądu stałego $u_r(I_{DCP})$ zmierzonego metodą pośrednią wyliczono stosując równanie [12, 13]

$$(5) \quad u_r(I_{DCP}) = \sqrt{u_r^2(U) + u_r^2(R)},$$

gdzie $u_r(U)$ – niepewność standardowa względna pomiaru napięcia, $u_r(R)$ – niepewność względna rezystora normalnego.

Otrzymany wynik tej składowej niepewności zależy od mierzonej wartości i wynosił od 0,2% do 0,5%, przy czym zastosowano rezystor wzorcowy kl. 0,02. Niepewność karty pomiarowej była natomiast nie gorsza niż $u_r(KP)=0,1\%$. Składnik niepewności odpowiadający za efekty przypadkowe $u(I_{BP})$ został wyznaczony z równania (6) [13]

$$(6) \quad u(I_{BP}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2}{n(n-1)}}.$$

Niepewność ta dla wszystkich mierzonych wartości prądu zawierała się w przedziale od 1 do 3%. W związku z tym niepewność łączną można wyznaczyć ze wzoru (7) [13]

$$(7) \quad u_r(I_{DC}) = \sqrt{u_r^2(I_{DCP}) + u_r^2(I_{BP}) + u_r^2(KP)}.$$

Ponieważ dominujący jest składnik niepewności typu A to współczynnik rozszerzenia przyjęto $k=2$ dla poziomu ufności $p=0,95$.

$$(8) \quad U_r(I_{DC}) = k * u_r(I_{DC}).$$

Ze wzoru (8) wyznaczono niepewności względne oraz zapisano wyniki pomiarów dla $N=200$.

Tabela 2 Wyniki pomiaru składowej stałej prądu sieciowego

I_{DC} [mA]	$I_{DC} \pm U(I_{DC})$ [mA]	$U_r(I_{DC})$ [%]
20,6	20,2±2,4	12
39,7	40,8±3,2	7,8
80,2	80,7±3,9	4,8
120,4	120,9±3,8	3,1
200,6	200,9±5,1	2,5
499,8	499,6±6,2	1,2
1000,5	1000,8±5,8	0,58

Wnioski

Poruszona problematyka zawiera nowe rozwiązanie wykorzystujące cewkę Rogowskiego do pomiaru prądu stałego o małej wartości będącej składnikiem prądu przemiennego o dużej wartości, nie wprowadzając przy tym dodatkowego błędu argumentu do mierzonej składowej zmiennej. Rozwiązanie polegające na wyznaczeniu chwil przejść prądu sieciowego przez wartość zerową z wykorzystaniem komparatora magnetycznego sprawdziło się pomimo sporych trudności związanych z występowaniem dużego rozrzutu pojedynczego pomiaru. Niewątpliwą zaletą zaprezentowanej metody jest możliwość wykonywania pomiarów dla dowolnych cewek Rogowskiego, przy znajomości jej współczynnika przetwarzania oraz uwzględniając ich właściwości częstotliwościowe. Z przeprowadzonych badań jednoznacznie wynika, że można poprawnie zmierzyć prąd stały o wartości nawet 20 mA występujący przy przepływie prądu przemiennego wynoszącego 100 A, co stanowi 0,02 % udziału tego prądu w sygnale mierzonym. Dla większych wartości prądu stałego względna różnica między wartością mierzoną i poprawną zmniejszała się. Ponadto zaleca się stosowanie komparatora magnetycznego z cienkim rdzeniem (rzędu kilkudziesięciu μm) o dużej wartości przenikalności początkowej wykonanym np. z materiałów nanokrystalicznych. Powstałe rozwiązanie układowe okazało się możliwe dzięki wykorzystaniu dwóch impulsów z komparatora magnetycznego dla zbrocza narastającego i opadającego jak pokazano na rysunku 1.

Autor: Daniel Dusza, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych. e-mail: daniel.dusza@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Kaczmarek M, Nowicz R., *Application of instrument transformers in power quality assesment*, Modern Electric Power Systems, 2010, Conference paper
- [2] Ary P. Nurmansah ; Syarif Hidayat *Design and testing PCB Rogowski-coil current sensor for high current application*, 2017

- International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)
- [3] Habrych M., *Analiza porównawcza właściwości metrologicznych dostępnych przetworników prądowych zastosowanych w obwodach z prądami odkształconymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 08/2014, str. 38
- [4] Szczęsny A., Pacholski K., Graczyk A., Domionikowski B., *Metoda wyznaczania częstotliwości granicznej pasma pracy przekładników prądowych wspomaganych elektronicznie*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 09/2010, str 31
- [5] Zhao Y., Crossley P., *Impact of DC bias on differential protection of converter transformers*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems,
- [6] Pan Z, Wang X, Tan B, Zhu L, Liu Y, Liu Y, et al. *Potential compensation method for restraining the DC bias of transformers during HVDC monopolar operation*. IEEE Trans Power Deliv 2016;31(1):103–11.
- [7] Kasztenny B, Fischer N, Taylor D, Prakash T, Jalli J. *Do CTs like DC? Performance of current transformers with geomagnetically induced currents*. 2016 69th annual conference for protective relay engineers (CPRE). 2016. p. 1–17.
- [8] Li C, Li Q, Li Z, Sun Q. *Transfer characteristics of current transformers with DC bias*. Proc CSEE 2010;30(19):127–32
- [9] Lu G, Huang T, Zhang F, Zheng T, Liu L. *The effects of the current transformer saturation on mal-operation under the DC magnetic bias caused by HVDC*. 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016). 2016.p. 1–6.
- [10] Nalepa R., Grecki F., Ostrogórska M., Aloszko P., Duc J., *DC-bias current measurement in high power AC grids*, 15th European Conference on power Electronics and Applications (EPE), 2013
- [11] Dusza D., *Wpływ zakłóceń od zewnętrznych pól magnetycznych na przetworniki prądu o jednorodnym obwodzie magnetycznym*. Pomiar, Automatyka, Kontrola. 2011, vol. 57, nr 12, s. 1522-1524.
- [12] Kalus-Jęcek B., Kuśmierk Z., *Wzorce wielkości elektrycznych i ocena niepewności pomiaru*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2006.
- [13] *Ewaluacja danych pomiarowych – przewodnik wyrażania niepewności pomiaru*, GUM, 2008.