

Analiza metrologiczna metody z przesunięciem ψ do pomiaru impedancji pętli zwarciowej

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy metrologicznej metody z przesunięciem ψ pomiaru impedancji pętli zwarciowej, w której pomiar opiera się o wyznaczenie składowych ortogonalnych fazora napięcia. Celem tej analizy jest sprawdzenie, które z parametrów miernika decydująco wpływają na dokładność pomiaru impedancji pętli.

Abstract. This paper presents measurement results of metrology analysis of method with shift ψ for loop impedance measurement. Loop impedance measurement in this method is based on determination of the orthogonal voltage components. The analysis goal is checking, which instrument parameters are the most important for accuracy of loop impedance measurement. (**Metrology analysis of method with shift ψ for loop impedance measurement**).

Słowa kluczowe: impedancja pętli, metrologia, miernik, metoda z przesunięciem ψ .

Keywords: loop impedance, metrology, meter, method with shift ψ .

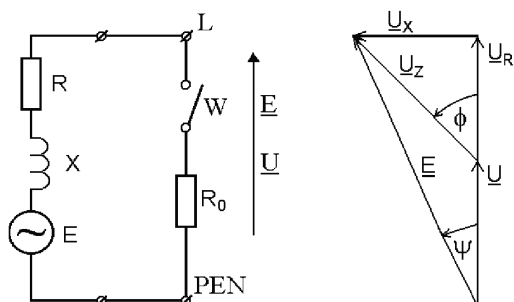
Wstęp

Mierniki impedancji pętli zwarciowej stosuje się do sprawdzania skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w sieciach niskiego napięcia. Obecnie istnieją coraz większe możliwości techniczne, pozwalające na rozwój metod i przyrządów do pomiaru impedancji pętli zwarciowej [1,2].

Dzięki powszechnemu wykorzystaniu elementów energoelektronicznych oraz mikroprocesorów w układach sterujących i pomiarowych możliwa stała się budowa miernika do pomiaru impedancji pętli metodą z przesunięciem ψ [2,3]. Do zalet tej metody można zaliczyć: małą masę i gabaryty ze względu na stosowanie rezystancyjnego obciążenia pomiarowego, eliminację błędu fazowego, (jednego z największych składowych błędów pomiaru impedancji pętli metodami klasycznymi).

Podstawy teoretyczne metody z przesunięciem ψ

Pomiar impedancji pętli zwarciowej Z metodą z przesunięciem ψ przebiega zgodnie ze schematem na rysunku 1.



Rys.1. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej: schemat zastępczy obwodu badanego i wykres fazorowy napięć w badanym obwodzie

Mierzoną wartością jest impedancja Z wyrażona zależnością:

$$(1) \quad Z = R + jX$$

którą wyznacza się na podstawie pomiaru dwóch napięć: napięcia E panującego w miejscu badanym przy odłączonym obciążeniu oraz napięcia U – jakie występuje przy włączonym obciążeniu pomiarowym o znanej wartości rezystancji R_0 oraz pomiarze kąta przesunięcia fazowego ψ między fazorami napięć \underline{E} i \underline{U} [3,4].

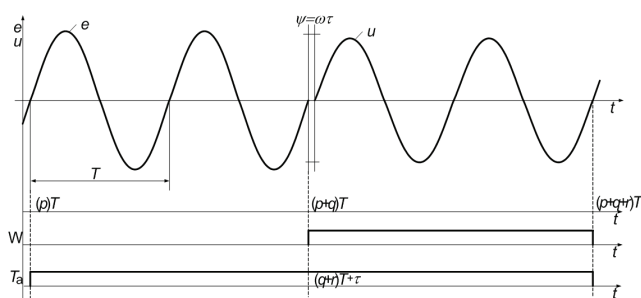
Impedancję pętli, wyznaczoną metodą z przesunięciem ψ , opisuje zależność:

$$(2) \quad Z_\psi = R_0 \sqrt{\left(\frac{E}{U} - 1\right)^2 + 4 \frac{E}{U} \sin^2 \frac{\psi}{2}}$$

Przesunięcie fazowe ψ określone jest zależnością $\psi = 2\pi\tau/T$. Przesunięcie czasowe τ , między napięciami przed i po załączeniu obciążenia pomiarowego R_0 , zgodnie z rysunkiem 2 można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$(3) \quad \tau = \text{mod}\left(\frac{T_a}{T}\right)$$

gdzie: T_a – czas jaki mija między wybranymi przejściami przez zero napięcia $e(t)$ i $u(t)$. W chwili załączenia wyłącznika W występuje stan przejściowy, który nie został zaznaczony na rysunku 2 (p, q, r – są liczbami naturalnymi, określającymi odpowiedni numer przejścia przez zero sygnału mierzonego).



Rys.2. Przebiegi mierzonych napięć i sygnałów sterujących

Wówczas zależność ma postać:

$$(4) \quad Z_\psi = R_0 \sqrt{\left(\frac{E}{U} - 1\right)^2 + 4 \frac{E}{U} \sin^2\left(\pi \frac{\tau}{T}\right)}$$

Zgodnie z zależnością (4) w celu wyznaczenia impedancji pętli zwarciowej metodą z przesunięciem ψ , należy zmierzyć napięcia E i U oraz przesunięcie τ między tymi napięciami.

Źródła błędów wynikające z parametrów miernika i stosowanej metody

Wyniki przeprowadzonej analizy metrologicznej mają na celu odpowiedź na pytanie: jak parametry poszczególnych elementów miernika wpływają na dokładność pomiaru impedancji pętli tym miernikiem?

Na błąd δZ_{ψ} wynikający z parametrów miernika i zastosowanej metody wpływ mają następujące czynniki:

- błąd pomiaru napięć,
- błąd wyznaczenia okresu T napięcia zasilającego,
- błąd wyznaczenia przesunięcia τ między napięciami,
- tolerancja wykonania rezystora obciążenia pomiarowego R_0 .

Błąd δZ_{ψ} wyznaczany jest na podstawie funkcji pomiaru. Funkcja pomiaru impedancji pętli jest funkcją następujących parametrów: $Z = f(R_0, E, U, T, \tau) = Z_{\psi}$.

Błąd graniczny $\delta Z_{\max\psi}$ wyznaczony dla najmniej korzystnego przypadku, czyli wtedy, gdy błędy wartości pośrednich przyjmują jednocześnie wartości maksymalne i mają te same znaki, opisany jest wzorem:

$$(5) \quad \delta Z_{\max\psi} = \left| \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial R_0} \frac{R_0}{Z} \delta R_0 \right| + \left| \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial E} \frac{E}{Z} \delta E \right| + \left| \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial U} \frac{U}{Z} \delta U \right| + \left| \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial \tau} \frac{\tau}{Z} \delta \tau \right| + \left| \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial T} \frac{T}{Z} \delta T \right|$$

Celem jest przedstawienie maksymalnych wartości błędów pomiaru impedancji pętli, jakich może spodziewać się użytkownik wybierając tę metodę pomiaru.

Należy pamiętać, że wartość impedancji pętli stanowi podstawowe kryterium oceny ochrony przeciwporażeniowej i szczególnie niebezpieczne są ujemne błędy pomiaru. Mogą one spowodować, że do ruchu zostaną dopuszczone urządzenia o nieskutecznej ochronie. Dlatego też bezpiecznie jest przeszacować ten błąd niż go nie doszacować.

Prezentowane w artykule wyniki analiz metrologicznych metody uzyskano dzięki symulacjom komputerowym przeprowadzonym w programie MathCad. Podczas analiz założono, że występuje tylko jedno źródło błędu pomiaru impedancji pętli zwarciowej – to aktualnie analizowane, a inne błędy w tym czasie nie występują.

Błąd pomiaru napięcia

Dokładność pomiaru impedancji pętli zależy również od błędu pomiaru napięcia E przed i U po załączeniu rezystancyjnego obciążenia pomiarowego R_0 . Błąd pomiaru napięć, na podstawie których wyznaczana jest wartość mierzonej impedancji, oznaczono jako ΔE_{ψ} i ΔU_{ψ} .

Na błąd pomiaru napięcia ΔE wpływ mają następujące czynniki: błąd przetwarzania napięcia przez przetwornik ΔE_{przetw} , błąd konwersji a/c sygnału pomiarowego ΔE_{DAQ} , błąd ΔE_{sk} wynikający z wyznaczenia wartości skutecznej napięcia z niecałkowitej liczby spróbkowanych okresów $(M+\lambda)T$ (gdzie M – liczba całkowita spróbkowanych okresów T napięcia, natomiast $\lambda \in \langle 0,1 \rangle$ – jest częścią ostatniego spróbkowanego okresu napięcia).

Całkowity błąd pomiaru napięcia ΔE_{ψ} na wejściu układu, dla najmniej korzystnego przypadku można wyznaczyć z następującej zależności:

$$(6) \quad \Delta E_{\psi} = \left| \Delta E_{\text{przetw}} \right| + \left| k_u \Delta E_{DAQ} \right| + \left| k_u \Delta E_{sk} \right|$$

gdzie: k_u – wzmacnienie przetwornika napięcia.

Błąd przetwarzania napięcia przez przetwornik ΔE_{przetw} definiuje się jako:

$$(7) \quad \Delta E_{\text{przetw}} = \sqrt{(E_{in})^2 + (\delta k \cdot E_{in})^2} - E_{in}$$

gdzie: δk to procent wartości skutecznej napięcia wejściowego E_{in} , wartość podawana przez producenta przetwornika.

Do analizy wykorzystano dane następujących przetworników firmy LEM: LV-20-P, LV25-P, CV-500. Błędy tych przetworników zostały zebrane na podstawie danych producenta [5] i zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Błąd ΔE_{przetw} przykładowych przetworników LEM

Lp.	Typ przetwornika	Całkowity błąd pomiaru δk [%]	E_{in} [V]	ΔE_{przetw} [mV]
1	LV-20-P	± 1	230	11,5
2	LV25-P	$\pm 0,8$		7,36
3	CV-500	$\pm 0,2$		0,46

Błąd konwersji a/c sygnału pomiarowego ΔE_{DAQ} zależy od: poziomu sygnału wejściowego E_{inDAQ} (napięcie wejściowe dla zastosowanej karty pomiarowej), błędu względnego $\delta E_{\%R}$, zależnego od aktualnej wartości mierzonej, błędu addytywnego przesunięcia zera δE_{offset} , błędu kwantyzacji i szumu $\delta E_{\text{noise+quant}}$ oraz przesunięcia charakterystyki związanego ze zmianą temperatury δE_{temp} (dryftu temperatury).

Wartość całkowitego błędu ΔE_{DAQ} pomiaru napięcia kartą pomiarową z uwzględnieniem wszystkich wymienionych czynników charakteryzuje następująca zależność [6]:

$$(8) \quad \Delta E_{DAQ} = \pm \left[(E_{inDAQ} \delta E_{\%R}) + (\Delta E_{\text{offset}} + \Delta E_{\text{noise+quant}} + \Delta E_{\text{temp}}) \right]$$

W trakcie projektowania układu pomiarowego miernika impedancji pętli przeanalizowano dokładność pomiaru napięcia następującymi kartami pomiarowymi firmy National Instruments serii E: 12-bitowe 6024 i 6070 oraz 16-bitową 6052. Całkowity błąd pomiaru napięcia ΔE_{DAQ} tymi kartami pomiarowymi dla tych samych warunków obliczono zgodnie ze wzorem (9), a wyniki zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Błąd pomiaru napięcia ΔE_{DAQ} oraz jego składowe dla przykładowych kart firmy NI, dla $E_{inDAQ} = 10V$

Lp.	Typ DAQ	$\delta E_{\%R}$ [%]	ΔE_{offset} [mV]	$\Delta E_{\text{noise+quant}}$ [mV]	ΔE_{DAQ} [mV]
1	6024	0,09	8,83	1,04	19,26
2	6070	0,07	6,38	0,85	15,37
3	6052	0,04	0,95	0,09	4,75

Błąd ΔE_{sk} wynikający z wyznaczenia wartości skutecznej napięcia z niecałkowitej liczby spróbkowanych okresów $(M+\lambda)T$.

W przypadku, gdy napięcie ma sinusoidalny kształt, błąd ΔE_{sk} określa następująca zależność [7]:

$$(9) \quad \Delta E_{sk} = \sqrt{2} \left[\frac{\sqrt{\frac{\sin(2\alpha) - \sin(4\pi(M+\lambda) + 2\alpha)}{(M+\lambda)} - 4\pi}}{4\sqrt{\pi}} - \frac{\sqrt{\frac{\sin(2\alpha) - \sin(4\pi M + 2\alpha)}{M}} - 4\pi}{4\sqrt{\pi}} \right]$$

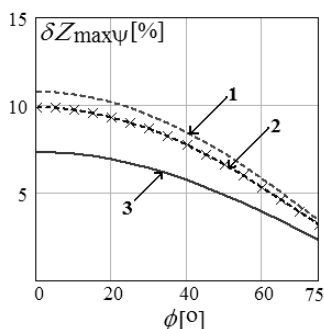
Zakładając $M=6$, $\alpha=0^\circ$, $E=10V$ oraz $\lambda=0,375$, ΔE_{sk} będzie równy 9,8mV.

Znając poszczególne składowe błędy pomiaru napięcia ΔE_ψ , można wyznaczyć jego wartość przeliczoną do wejścia układu. Wyniki tych szacunków zostały zaprezentowane w tabeli 3.

Tabela 3. Błąd pomiaru napięcia ΔE_ψ dla przykładowych przetworników i kart pomiarowych

Lp.	LEM	k_u	Typ DAQ	ΔE_{przetw} [mV]	ΔE_{DAQ} [mV]	ΔE_{sk} [mV]	ΔE_ψ [V]	
1.	LV-20-P	66	6024	11,5	19,26	9,8	1,93	
2.			6070				15,37	1,67
3.			6052				4,75	0,97
4.	LV25-P	66	6024	7,36	19,26	9,8	1,93	
5.			6070				15,37	1,67
6.			6052				4,75	0,97
7.	CV-500	50	6024	0,46	19,26	9,8	1,45	
8.			6070				15,37	1,26
9.			6052				4,75	0,73

Rysunek 3 przedstawia wartość błędu $\delta Z_{\text{max}\psi}$ w funkcji argumentu ϕ dla $Z/R_0=0,1$, przetwornika CV-500 oraz kart pomiarowych 6024, 6070 oraz 6052.

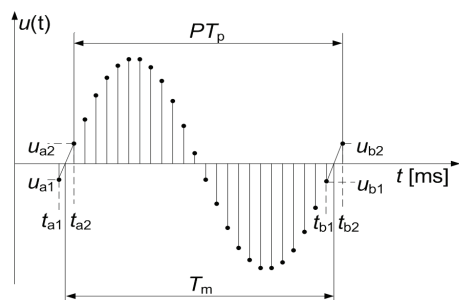


Rys.3. Błąd $\delta Z_{\text{max}\psi}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$, $1-\Delta E_\psi=1,45V$, $2-\Delta E_\psi=1,26V$, $3-\Delta E_\psi=0,73V$

W konfiguracji sprzętowej miernika: przetwornik LEM CV-500 oraz karta pomiarowa National Instruments 6052 błąd pomiaru napięcia przełoży się maksymalnie na 7,3% niedokładność wyznaczenia impedancji pętli (rysunek 3).

Dokładność wyznaczenia okresu T mierzonego napięcia

Okres T mierzonego sygnału wyznacza się metodą opierającą się na próbkowaniu sygnału z aproksymacją chwil przejścia przez zero (rysunek 4).

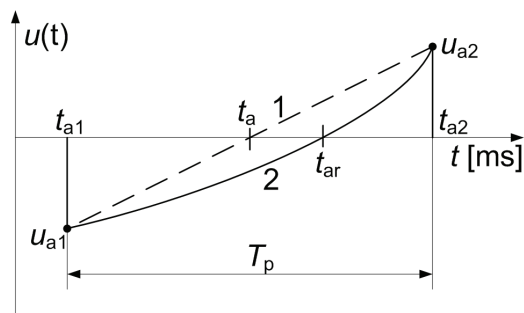


Rys.4. Próbkowanie sygnału z aproksymacją chwil przejścia przez zero

Proces pomiaru rozpoczyna się od spróbkowania mierzonego sygnału z zadaną częstotliwością $f_p=1/T_p$

Następnie dla wszystkich próbek napięcia u_i wyznacza się iloczyn wartości dwóch sąsiednich próbek, co pozwala na wyznaczenie miejsc zerowych.

Dokładność pomiaru okresu zależy jest od błędu związanego z aproksymacją sinusoidy linią prostą (rys. 5).



Rys.5. Błąd metody próbkowania sygnału z aproksymacją chwil przejścia przez zero: 1 – aproksymacja linią prostą, 2 – sygnał rzeczywisty [8]

Wartość tego błędu jest wprost proporcjonalna do sumy różnic pomiędzy wartościami dokładnymi t_{ar} i t_{br} , a odpowiednio wartościami t_a i t_b , uzyskanymi z prostoliniowej aproksymacji, i odwrotnie proporcjonalna do okresu próbkowania:

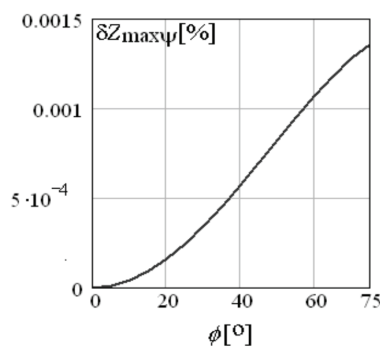
$$(10) \quad \delta T_m = \frac{t_{ar} - t_a}{T_p} + \frac{t_{br} - t_b}{T_p}$$

gdzie: t_{ar} , t_{br} – miejsca zerowe sygnału rzeczywistego, t_a , t_b – miejsca zerowe prostoliniowej aproksymacji.

W trakcie pomiaru okresu metodą aproksymacyjną występują również błędy wynikające z ograniczonej dokładności przetwornika analogowo-cyfrowego δE_{DAQ} (względny błąd pomiaru napięcia daną kartą pomiarową odniesiony do zakresu mierzonego sygnału).

Uwzględniając ten fakt i przyjmując $T_p=0,5\mu s$ (400 próbek na okres napięcia), $\Delta E_{\text{DAQ}}=5mV$, otrzymujemy dla sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 50Hz błąd pomiaru okresu metodą aproksymacyjną równy $\Delta T=0,3\mu s$.

Błąd pomiaru okresu ΔT rzędu $0,3\mu s$ przekłada się na $1,5 \cdot 10^{-3}\%$ błąd pomiaru impedancji pętli (rysunek 6).



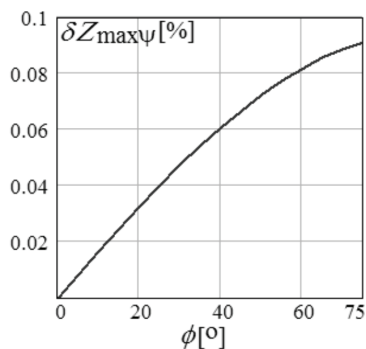
Rys.6. Błąd $\delta Z_{\text{max}\psi}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$, $\Delta T=0,3\mu s$

Największy wpływ błędnego wyznaczenia okresu napięcia występuje wówczas, gdy pomiar impedancji pętli odbywa się w pobliżu transformatora, czyli dla $\phi > 45^\circ$.

Dokładność wyznaczenia przesunięcia τ między napięciami

Jak wykazano w pracy [8] dla metody z przesunięciem ψ , błąd bezwzględny $\Delta\tau$ pomiaru przesunięcia fazowego jest równy co do wartości błędowi bezwzględnemu ΔT pomiaru okresu napięcia. Wobec czego przyjęto $\Delta\tau$ równe $0,3\mu\text{s}$.

Metoda z przesunięciem ψ pomiaru impedancji pętli zwarcia jest bardziej wrażliwa na niedokładność wyznaczenia przesunięcia między napięciami $\Delta\tau$ niż na niedokładność pomiaru okresu ΔT . Fakt ten potwierdza rysunek 7, na którym widać, że dla przyjętych danych błąd $\delta Z_{\max\psi}(\Delta\tau)$ nie przekracza $0,1\%$, dla tych samych danych $\delta Z_{\max\psi}(\Delta T)$ nie przekracza $0,0015\%$ (rysunek 6).



Rys.7. Błąd $\delta Z_{\max\psi}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$, $\Delta\tau=0,3\mu\text{s}$

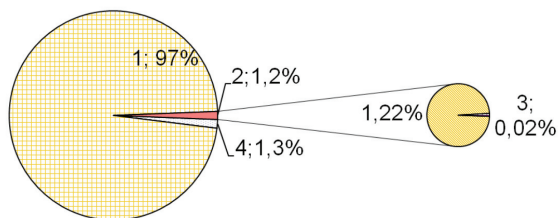
Tolerancja wykonania rezystora obciążenia pomiarowego

Błąd pomiaru impedancji pętli, wynikający z tolerancji wykonania rezystora obciążenia pomiarowego R_0 , związany jest z klasą dokładności podaną przez producenta rezystora. Analizę przeprowadzono przyjmując, że rezystor obciążenia pomiarowego R_0 równy 10Ω wykonany jest z dokładnością $0,01$, $0,05$, $0,1\%$.

Przeprowadzone symulacje wykazały, że taka dokładność rezystora przekłada się odpowiednio na $0,01$, $0,05$, $0,1\%$ błąd wyznaczenia impedancji pętli.

Wnioski

Przedstawione w publikacji wyniki analiz przeprowadzono przy założeniu, że występuje tylko jedno źródło błędów pomiaru impedancji pętli zwarcia – to aktualnie analizowane, a inne błędy w tym czasie nie występują. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest oszacowanie udziału poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji pętli zwarcia δZ_{ψ} realizowanego zgodnie z metodą z przesunięciem ψ (rysunek 8).



Rys.8. Szacunek udziałów poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji pętli zwarcia $\delta Z_{\max\psi}$, realizowanego zgodnie z metodą z przesunięciem ψ , dla przyjętych parametrów: $E_z=230\text{V}$,

$Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$, $\Delta R_0=10\text{m}\Omega$, $\Delta E_{\psi}=\Delta U_{\psi}=1,45\text{V}$, $\Delta\tau=\Delta T=0,3\mu\text{s}$
Składowe błędy związane z: 1- ΔE i ΔU , 2- $\Delta\tau$, 3- ΔT , 4- ΔR_0

Rysunek 8 potwierdza fakt, iż w trakcie projektowania i realizacji konstrukcji miernika należy szczególnie zadbać o to, aby błąd pomiaru napięcia był jak najmniejszy, bowiem jego znaczenie jest największe.

Istotny jest również dokładny pomiar przesunięcia τ między napięciami. Rezystor obciążenia pomiarowego powinien być wykonany z tolerancją maksymalnie $\pm 0,1\%$.

Całkowity błąd pomiaru $\delta Z_{\max\psi}$ wynikający z parametrów miernika w przypadku uwzględnienia wszystkich błędów składowych (dla danych $E_z=230\text{V}$, $Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$, $\Delta E_{\psi}=\Delta U_{\psi}=1,45\text{V}$, $\Delta R_0=10\text{m}\Omega$, $\Delta\tau=0,3\mu\text{s}$, $\Delta T=0,3\mu\text{s}$) nie przekracza $7,5\%$. Należy pamiętać, iż jest to maksymalna wartość błędów, jakiego może spodziewać się użytkownik wykonując pomiar miernikiem wykorzystującym metodę z przesunięciem ψ , dla założonych elementów składowych miernika.

Wyniki przeprowadzonych przez autorkę publikacji badań eksperymentalnych miernika impedancji pętli wykorzystującego metodę z przesunięciem ψ [8] (elementy miernika stanowiły: przetwornik LEM CV-500, karta pomiarowa firmy National Instruments 6024E oraz rezystor klasy $0,1\%$) wykazały, że w praktycznych warunkach przeprowadzenia pomiaru, możliwy jest pomiar impedancji pętli z błędem nieprzekraczającym 3% .

Badania doświadczalne potwierdziły również wyniki otrzymane z symulacji, mówiące, że dokładność miernika działającego zgodnie z metodą z przesunięciem ψ związana jest głównie z błędem pomiaru napięcia, tolerancją wykonania obciążenia pomiarowego oraz dokładnością wyznaczenia przesunięcia między napięciami.

LITERATURA

- [1] Nawrocki Z., Stafiniak A., Parametry i rozwiązania układowe mierników rezystancji i impedancji pętli zwarcia. I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna *Bezpieczne urządzenia energoelektroniczne*, I (1987), 219-226
- [2] Roskosz R., Sposób i układ do pomiaru modułu impedancji pętli zwarcia, Patent RP nr 159 333 z dn. 31.12.1992
- [3] Golijanek-Jędrzejczyk A., Badanie metody pomiaru impedancji pętli zwarcia wykorzystującej składowe fazy napięcia, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2006
- [4] Czapp S., Roskosz R., Analiza dokładności pomiaru impedancji pętli zwarcia z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 17(2001), nr.17, 11-18
- [5] Katalog firmy Dacpol: *Podzespoły dla elektroenergetyki*. 2002
- [6] Katalog firmy National Instruments, 2007
- [7] Nowotny M., Sedlacek M., New Class of Time Domain Algorithms of RMS Value Measurement of Non-Coherently Sampled Signals, 14th IMEKO Symposium on New Technologies in Measurement and Instrumentation and 10th Workshop on ADC Modelling and Testing, I (2005), 235-240
- [8] Golijanek-Jędrzejczyk A., Świsulski D., Roskosz R., Wpływ błędów pomiaru okresu na dokładność wyznaczenia impedancji pętli zwarcia w sieciach o napięciu odkształconym. *Kongres Metrologii*, 2(2004), 657-660

Autorka: dr inż. Anna Golijanek-Jędrzejczyk, Politechnika Gdańska, Katedra Metrologii i Systemów Informatycznych, ul. G.Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, E-mail: aqol@elv.pg.gda.pl;