

ANALIZA METROLOGICZNA MODELU MIERNIKA DO POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ METODĄ WEKTOROWĄ

Anna GOLIJANEK-JĘDRZEJCZYK

Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, tel: 058 347 1872
fax: 058 347 1726 e-mail: a.golijanek@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: W referacie zaprezentowano wyniki analizy metrologicznej modelu miernika do pomiaru impedancji pętli zwarcia metodą wektorową, uzyskane na podstawie symulacji przeprowadzonych w programie Mathcad. Przedstawiono wpływ przykładowych elementów miernika na dokładność pomiaru impedancji pętli oraz udział poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji.

Słowa kluczowe: metoda wektorowa, metrologia, impedancja.

1. WPROWADZENIE

Pomiar impedancji pętli jest bardzo istotny, ze względu na fakt, iż wartość impedancji pętli stanowi podstawowe kryterium oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej. To tłumaczy również, dlaczego tak ważny jest pomiar impedancji pętli zwarciowej z jak najmniejszym błędem. Należy pamiętać, iż szczególnie niebezpieczne są ujemne błędy pomiaru albowiem mogą one spowodować, że do ruchu zostaną dopuszczone urządzenia o nieskutecznej ochronie.

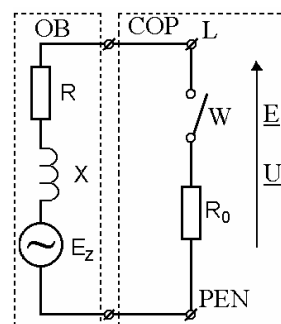
W referacie przeanalizowano wpływ poszczególnych błędów wynikających z budowy miernika działającego zgodnie z metodą wektorową [1, 2, 3] na dokładność pomiaru impedancji pętli zwarcia.

Autorka postawiła sobie za cel wyznaczenie i przedstawienie maksymalnych wartości błędów pomiaru impedancji pętli, jakich może spodziewać się użytkownik wybierając tę metodę pomiaru.

Przedstawione wyniki analiz przeprowadzono przy założeniu, że występuje tylko jedno źródło błędów pomiaru impedancji pętli zwarciowej – to aktualnie analizowane, a inne błędy w tym czasie nie występują. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest również oszacowanie udziału poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji pętli zwarciowej realizowanego zgodnie z metodą wektorową.

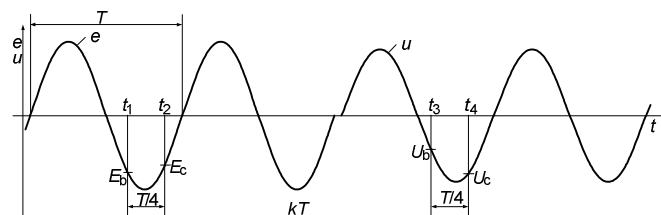
2. PODSTAWY TEORETYCZNE METODY WEKTOROWEJ

W metodzie wektorowej pomiar impedancji pętli polega na wyznaczeniu składowych ortogonalnych dwu napięć, w układzie jak na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy badanego obwodu

Wektor napięcia E przed załączeniem obciążenia pomiarowego wyznacza się mierząc chwilowe wartości napięcia e w dwu odpowiednio wybranych momentach czasu. Ta sama procedura stosowana jest przy wyznaczeniu fazona U (rys. 2).



Rys. 2. Przebiegi zmierzonych napięć

Pierwsza wartość chwilowa E_b zostaje pobrana do obliczeń w czasie t_1 . Wartość E_c w chwili t_2 przesuniętej o $T/4$ w stosunku do t_1 (gdzie T – jest okresem zmierzonego napięcia).

Następne dwie próbki: U_b i U_c pobrane zostają po k okresów w stosunku do pierwszych.

Na podstawie tych czterech wartości chwilowych napięć wyznaczana jest kolejno rezystancja R i reaktancja X pętli zwarciowej a następnie jej impedancja, z następującej zależności:

$$Z = R_0 \sqrt{\frac{(E_c - U_c)^2 + (E_b - U_b)^2}{U_c^2 + U_b^2}} \quad (1)$$

3. ANALIZA METROLOGICZNA METODY WEKTOROWEJ

Błąd pomiaru impedancji pętli zwarciowej, wynikający z budowy miernika i stosowanej metody, wektorowej został wyznaczony z funkcji pomiaru, opisanej zależnością:

$$Z = f(E_b, E_c, U_b, U_c, t_1, t_2, t_3, t_4, R_0) = Z_w \quad (2)$$

Zgodnie z prawem przenoszenia błędów bezwzględny błąd pomiaru ΔZ_w jest określony wzorem:

$$\begin{aligned} \Delta Z_w = & \frac{\partial Z_w}{\partial E_b} \Delta E_b + \frac{\partial Z_w}{\partial E_c} \Delta E_c + \frac{\partial Z_w}{\partial U_b} \Delta U_b + \\ & + \frac{\partial Z_w}{\partial U_c} \Delta U_c + \frac{\partial Z_w}{\partial t_1} \Delta t_1 + \frac{\partial Z_w}{\partial t_2} \Delta t_2 + \\ & + \frac{\partial Z_w}{\partial t_3} \Delta t_3 + \frac{\partial Z_w}{\partial t_4} \Delta t_4 + \frac{\partial Z_w}{\partial R_0} \Delta R_0 \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

$\Delta E_b, \Delta E_c, \Delta U_b, \Delta U_c$ – błąd pomiaru wartości chwilowych napięcia przed i po załączeniu obciążenia pomiarowego,

$\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ – błąd pomiaru momentów czasowych próbek napięcia E_b, E_c, U_b, U_c ,

ΔR_0 – tolerancja wykonania rezystancji obciążenia pomiarowego.

Wówczas błąd graniczny δZ_{maxw} jest opisany następującą zależnością:

$$\begin{aligned} \delta Z_{maxw} = & \left| \frac{\partial Z_w}{\partial E_b} \frac{E_b}{Z} \delta E_b \right| + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial E_c} \frac{E_c}{Z} \delta E_c \right| + \\ & + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial U_b} \frac{U_b}{Z} \delta U_b \right| + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial U_c} \frac{U_c}{Z} \delta U_c \right| + \\ & + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial t_1} \frac{t_1}{Z} \delta t_1 \right| + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial t_2} \frac{t_2}{Z} \delta t_2 \right| + \\ & + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial t_3} \frac{t_3}{Z} \delta t_3 \right| + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial t_4} \frac{t_4}{Z} \delta t_4 \right| + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial R_0} \frac{R_0}{Z} \delta R_0 \right| \end{aligned} \quad (4)$$

Przy założeniu sinusoidalnego napięcia zasilającego na wartość błędu granicznego δZ_{maxw} wpływ mają następujące czynniki (wynikające jedynie z budowy miernika): błąd pomiaru napięcia, błąd wyznaczenia momentów czasowych, w których pobierane są próbki napięcia E_b, E_c, U_b, U_c oraz tolerancja wykonania rezystora obciążenia pomiarowego.

3.1. Błąd pomiaru napięcia

Na błąd ΔE_w pomiaru napięcia składają się następujące czynniki:

- dokładność przetwarzania napięcia przez przetwornik ΔE_{przetw}
- błąd konwersji a/c sygnału pomiarowego ΔE_{DAQ} .

Całkowity graniczny błąd pomiaru napięcia, przeliczony do wejścia układu, dla każdej z czterech próbek napięcia $\Delta E_b = \Delta E_c = \Delta U_b = \Delta U_c = \Delta E_w$, można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta E_w = \left| \Delta E_{przetw} \right| + \left| k_u \Delta E_{DAQ} \right| \quad (5)$$

gdzie: k_u – wzmacnienie przetwornika napięcia.

Błąd pomiaru napięcia ΔE_{przetw} przetwornikiem wyznacza się jako iloczyn napięcia wejściowego i błędu podanego przez producenta [4], zgodnie ze wzorem:

$$\Delta E_{przetw} = \delta k \cdot E_{in} \quad (6)$$

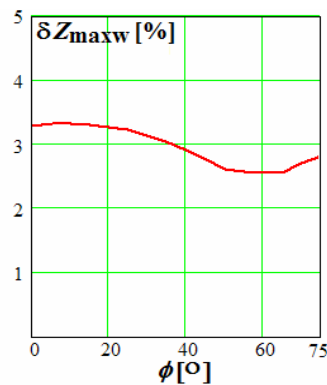
przez E_{in} oznaczono wartość napięcia wejściowego.

Błąd konwersji a/c sygnału pomiarowego ΔE_{DAQ} zależy od: poziomu sygnału wejściowego E_{inDAQ} , błędu względnego $\delta E_{\%R}$, zależnego od aktualnej wartości mierzonej, błędu addytywnego przesunięcia zera δE_{offset} , błędu kwantyzacji i szumu $\delta E_{noise+quant}$ 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 [5]:

$$\Delta E_{DAQ} = \pm \left[\left(E_{inDAQ} \cdot \delta E_{\%R} \right) + \left(\Delta E_{offset} + \Delta E_{noise+quant} + \Delta E_{temp} \right) \right] \quad (7)$$

Rozpatrzono przypadek, w którym w torze napięciowym miernika występuje przetwornik LEM CV-500 oraz karta pomiarowa firmy NI 6024E. Przy tej konfiguracji sprzętowej, zgodnie z powyższymi zależnościami, błąd pomiaru napięcia ΔE_w nie przekracza 0,8V. Taki błąd pomiaru napięcia skutkuje niedokładnością pomiaru impedancji metodą wektorową rzędu 3,3% (rys. 3).



Rys. 3 Błąd $\delta Z_{maxw} = f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega, R_0=4\Omega, \Delta E_w = \Delta E_b = \Delta E_c = \Delta U_b = \Delta U_c = 0,8V$

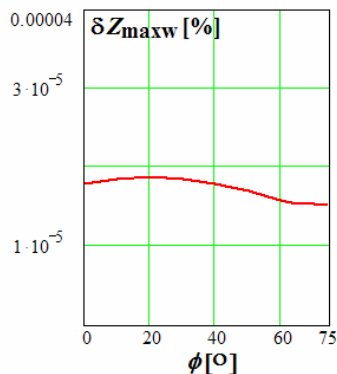
3.2. Błąd wyznaczenia momentów czasowych

Na dokładność pomiaru impedancji pętli metodą wektorową ma wpływ również dokładność wyznaczenia momentów czasowych $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$. Dokładność wyznaczenia momentów czasowych, w których pobierane są wartości chwilowe napięć, zależy od błędu pomiaru okresu napięcia sieci ΔT , czasu próbkowania T_p oraz położenia danej próbki, zgodnie ze wzorem:

$$\Delta t_l = \frac{i_l}{N} \Delta T + T_p \quad (8)$$

gdzie: i_l – numer próbki, $l = 1, 2, 3, 4$ odpowiednio dla próbek napięcia E_b, E_c, U_b, U_c .

Błąd wyznaczenia położenia próbek wzrasta liniowo wraz ze wzrostem odległości od pierwszej próbki. Przyjmując, że $T_p=0,5\mu s$, liczba próbek $N=20000$ (na okres przypada 200 próbek) $\Delta T=0,3\mu s$, $t_1=20T_p$, $t_2=70T_p$, $t_3=1220T_p$, $t_4=1270T_p$, na podstawie wzoru (8) otrzymujemy: $\Delta t_1=0,5\mu s$, $\Delta t_2=0,5\mu s$, $\Delta t_3=0,5002\mu s$, $\Delta t_4=0,5002\mu s$. Wpływ takiego błędu wyznaczenia momentów czasowych na dokładność pomiaru impedancji pętli przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Błąd $\delta Z_{\max w} = f(\phi)$ dla danych $Z=1\Omega$, $R_0=4\Omega$, $\Delta t=\Delta t_1=\Delta t_2=\Delta t_3=\Delta t_4=0,5\mu s$

Dla tych samych danych badanego obwodu i obciążenia pomiarowego, błąd pomiaru impedancji pętli nie przekracza 0,004%, czyli o 3 rzędy mniejszy.

3.3. Tolerancja wykonania obciążenia pomiarowego

Analizę wpływu tolerancji wykonania rezystora obciążenia pomiarowego R_0 na dokładność wyznaczenia impedancji pętli przeprowadzono przy założeniu, że wartość rezystora obciążenia pomiarowego R_0 jest równa 10Ω . Badania przeprowadzono dla następujących klas dokładności tego rezystora: 0,01, 0,05, 0,1 (tab. 1).

Tablica 1. Błąd $\delta Z_{\max w}$ wyznaczenia impedancji pętli, dla $R_0=10\Omega$

l.p.	ΔR_0 [mΩ]	ΔR_0 [%]	$\delta Z_{\max w}$ [%]
1.	1	0,01	0,01
2.	5	0,05	0,05
3.	10	0,1	0,1

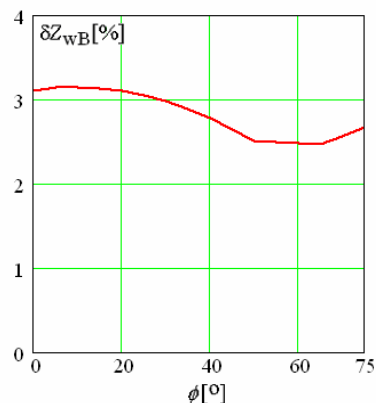
Tolerancja rezystora obciążenia pomiarowego $\Delta R_0=0,001$, 0,005, 0,01Ω przekłada się na błąd $\delta Z_{\max w}$ wyznaczenia impedancji pętli odpowiednio 0,01, 0,05, 0,1%.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Celem badań była odpowiedź na pytanie: „Jakiego maksymalnie błędu pomiaru impedancji pętli (wynikającego bezpośrednio z budowy miernika i stosowanej metody) może spodziewać się użytkownik wykonując pomiar impedancji pętli zwarcia miernikiem działającym zgodnie z metodą wektorową?”.

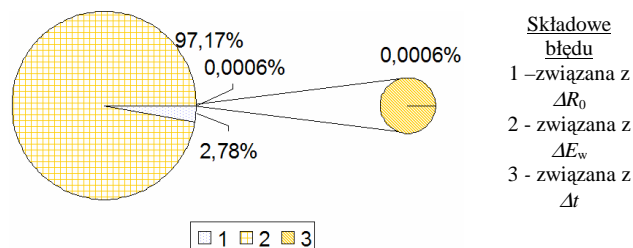
Odpowiedź ta zależy oczywiście od doboru elementów miernika przez konstruktora. Jednak jak wykazały przedstawione wyniki analizy metrologicznej metody wektorowej (rys. 5) możliwy jest pomiar impedancji pętli z

błędem nieprzekraczającym 4% (dla konfiguracji sprzętowej: przetwornik LEM CV-500, karta pomiarowa 6024E firmy National Instruments, rezystor klasy 0,01).



Rys. 5. Błąd $\delta Z_{\max w} = f(\phi)$ dla danych: $E_z=230V$, $Z=1\Omega$, $R_0=4\Omega$, $\Delta E_w=0,8V$, $\Delta R_0=4m\Omega$, $\Delta T=0,3\mu s$, $\Delta t=0,5\mu s$

Na podstawie przeprowadzonej analizy możliwe jest również oszacowanie udziału poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji pętli zwarcia realizowanego zgodnie z metodą wektorową. Udział poszczególnych składowych błędów został przedstawiony na rysunku 6.



Rys. 6. Udział poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji pętli zwarcia $\delta Z_{\max w}$ dla przyjętych parametrów: $E_z=230V$, $Z=1\Omega$, $R_0=4\Omega$, $\Delta R_0=4m\Omega$, $\Delta E_w=0,8V$, $\Delta t=0,5\mu s$

Wykres z rysunku 6, 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. Rezystor obciążenia pomiarowego powinien być wykonany z tolerancją maksymalnie $\pm 0,1\%$.

5. BIBLIOGRAFIA

- Golijanek-Jędrzejczyk A.: Badanie metody pomiaru impedancji pętli zwarcia wykorzystującej składowe fazora napięcia. Rozprawa doktorska, Gdańsk 2006.
- Roskosz R.: Sposób i układ do pomiaru modułu impedancji pętli zwarcia. Patent RP nr 159 333 z dn. 31.12.1992.
- Roskosz R.: Nowe rozwiązania pomiaru impedancji pętli zwarcia przy odkształceniu krzywej napięcia w miejscu badania. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka nr 79, Gdańsk 1995.
- Katalog firmy Dacpol: Podzespoły dla elektroenergetyki. 2002
- Katalog firmy National Instruments, 2007.

METROLOGICAL ANALYSIS OF MODEL OF A VECTOR LOOP IMPEDANCE METER

Keywords: vector method, metrology, impedance

This paper shows results of metrology analysis of loop impedance meter, which is based on vector method. Presented results are obtained through simulation in Mathcad. There are elements of the device influence on the accuracy of loop impedance measurement shown.