

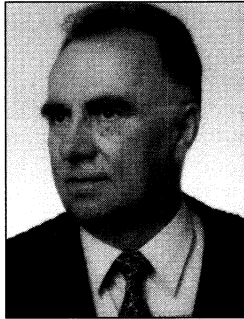
## Ryszard ROSKOSZ

POLITECHNIKA GDAŃSKA

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI, KATEDRA MIERNICTWA ELEKTRYCZNEGO

# Zagadnienia wpływu odkształcenia krzywej napięcia sieci na pomiar impedancji pętli zwarciowej

Dr hab. inż. Ryszard ROSKOSZ



Profesor nadzwyczajny Politechniki Gdańskiej. Ukończył studia na wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej w 1965 roku. W 1975 r. uzyskał stopień doktora, a w 1995 r. stopień doktora habilitowanego. Obydwa stopnie uzyskał na Wydziale Elektrycznym PG. Od 1996 roku Kieruje Katedrą Miernictwa Elektrycznego na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki PG. Jest autorem i współautorem ponad 110 prac naukowych w tym dwóch monografi, dwóch skryptów oraz dwudziestu patentów. Główne zainteresowania zawodowe są związane z pomiarami parametrów układów elektroenergetycznych, jakością energii elektrycznej oraz z wirtualnymi przyrządami pomiarowymi. Członek sekcji Podstawowe Problemy Metrologii Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN oraz członek sekcji T10C KBN w dwóch konkursach. Jest członkiem IEEE, SEP oraz PTETiS.

### Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę pomiaru impedancji pętli zwarciowej szczególnie w tych układach niskiego napięcia, gdzie krzywa napięcia w miejscu badania może być odkształcona. Przeprowadzono analizę wpływu wyższych harmonicznych zawartych w napięciu badanym na błędy pomiaru impedancji pętli przy stosowaniu klasycznych metod opartych na pomiarze skutecznych wartości oraz dla metod wykorzystujących amplitudy mierzonych napięć. Badania i obliczenia błędów pomiaru przeprowadzone zostały dla wybranych typów odkształceń krzywej napięcia oraz dla różnych parametrów obwodu badanego, a przykładowe wyniki badań zaprezentowano w tablicy i na wykresach. Z analizy wynika, że błąd pomiaru może znacznie przekroczyć wartość dopuszczalną przez przepisy. Przeprowadzona analiza, umożliwi ocenę, które znane metody i przyrządy mogą być stosowane do wyznaczania impedancji pętli przy wyraźnym odkształceniu krzywej napięcia.

### Abstract

This paper discusses and analyses the effects of supply voltage harmonics on accuracy of power system loop impedance measurement. Special attention is given to the study of impedance measurement methods, which are based on the measurement of rms or maximum voltage values. Examples of measurement error values are presented in the form of a table and curves for different parameters of the tested circuit. The result of this study indicates that under unfavorable measuring condition the measurement error may exceed the permissible value given by standards. An analysis allows for the assessment, which known loop impedance measuring methods and instruments may be use in networks with distinct voltage waveform distortion.

## 1. WPROWADZENIE

Wartość impedancji pętli zwarciowej ma istotne znaczenie prak-

tyczne, bowiem charakteryzuje warunki zwarciove i napięciowe w systemie elektroenergetycznym. Znajomość zmierzonej wartości impedancji pętli zwarciowej ma szczególne znaczenie przy wyznaczaniu prądu zwarcia jednofazowego w sieciach niskiego napięcia, zwłaszcza dla sprawdzenia warunku samowylaczenia, który jest podstawowym kryterium oceny skuteczności zerowania i uziemienia ochronnego.

Większość stosowanych [3, 4, 7, 11, 12] technik pomiaru impedancji pętli zwarciowej  $Z$  wykorzystuje tzw. metodę sztucznego zwarcia, polegającą na pomiarze dwu wartości napięcia w rozpatrywanym miejscu: jedną  $E$  – przy wylaczonej i drugą  $U$  – przy zalaczonej impedancji obciazenia pomiarowego o znanej wartości  $Z_0$ . Wyznaczenie wyniku pomiaru przebiega rozmaicie, zalezy bowiem od wlasciwosci zastosowanej metody. Jest w swiecie kilkadziesiat firm produkujacych mierniki impedancji [12], ktore moga byc stosowane tylko w sieciach o sinusoidalnym ksztalcie krzywej napięcia w miejscu pomiaru, a wiec nie daja pewności prawidłowego wyniku w obwodach o napięciu odkształconym.

Dotychczasowe przepisy [1, 5, 10] dotyczące pomiarów impedancji pętli zwarciowej nie zajmują się wpływem odkształcenia napięcia na błąd pomiaru, gdyż wpływ ten nie był dotąd zauważalny. Problem ma coraz większe znaczenie praktyczne, gdyż krzywa napięcia w miejscu pomiaru bywa bardziej odkształcona [2]. Przyczyną deformacji jest upowszechnienie odbiorników ze sterowaniem energoelektronicznym.

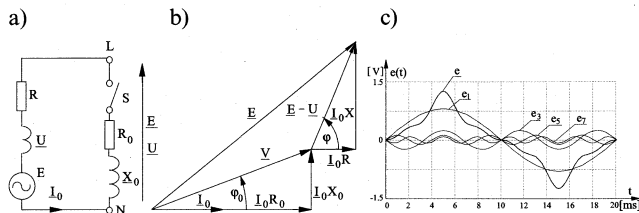
W badaniach stanu ochrony przeciwporażeniowej szczególne znaczenie ma dokładność pomiaru parametrów pozwalających na ocenę skuteczności systemu ochrony. Odbiorcze oraz okresowe pomiary impedancji pętli zwarciowej w sieciach z zerowaniem mogą jednak być obciążone znacznym błędem wynikającym z odkształcenia krzywej napięcia. Szczególnie groźne są błędy ujemne, gdyż dopuszczone do eksploatacji urządzenie o niesprawnej ochronie zagraża porażeniem elektrycznym.

W sieciach o napięciu odkształconym, w których stosuje się zerowanie, ochroną obejmuje się wszelkie odbiorniki, także odbiorniki zakłócające. W sieciach takich, o ocenie skuteczności zerowania powinien decydować moduł impedancji pętli  $Z$ , określony przez harmoniczne podstawowe prądu i napięcia. Dopuszczalna wartość impedancji pętli zwarciowej, wynikająca z wymagań odpowiednich norm, powinna być określona dla harmonicznej podstawowej, bowiem rzutuje ona na dobór zabezpieczeń zwarciowych, reagujących na skuteczną wartość prądu. W warunkach ruchowych udział harmonicznych w krzywej napięcia w miejscu pomiaru podlega dużym zmianom, natomiast składowa podstawowa SEM występuje zawsze i zakłada się, że ma wartość stałą. Jeżeli harmoniczna podstawowa prądu zwarciowego będzie wystarczająco duża, zostanie spełniony warunek samowylaczenia. Ewentualne odkształcenie napięcia skróci czas zadziałania zabezpieczenia, a więc wpłynie korzystnie na skuteczność ochrony.

W artykule omówiono wpływ odkształceń napięcia na błędy pomiaru impedancji pętli zwarciowej. Pozwoli to ocenić, które znane przyrządy i metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej mogą być stosowane w sieciach o wyraźnym odkształceniu krzywej napięcia.

## 2. PODSTAWY TEORETYCZNE KLASYCZNYCH METOD POMIARU

Znane metody i przyrządy [3, 6, 7, 11, 12] do pomiaru impedancji pętli zwarciowej  $Z = R + jX$  opierają się na założeniu, że obiekt badany można przedstawić za pomocą prostego schematu (rys. 1a), złożonego z elementów liniowych. Schemat ten jest rozumiany jako zastępczy, powstający z połączenia źródła o sinusoidalnej SEM oraz impedancji elementów pętli. Impedancja obciążenia pomiarowego  $Z_0 = R_0 + jX_0$  złożona jest z szeregowego połączenia rezystancji  $R_0$  oraz reaktancji indukcyjnej  $X_0$ .



Rys. 1. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej: a) – uproszczony schemat obwodu badanego, b) – wykres wskazowy, c) – przebiegi czasowe napięcia

W miejscu pomiaru wyznacza się dwie wartości napięcia: jedną,  $E$  – przy otwartym łączniku  $W$ , oraz drugą  $U$  – przy zamkniętym łączniku. Zamknięcie łącznika  $W$  powoduje włączenie obciążenia pomiarowego o znanej wartości impedancji  $Z_0$ .

Mierzoną impedancję pętli określa ściśle zależność zespolona

$$Z = Z_0 \frac{E-U}{U} = Z_0 \left( \frac{E}{U} - 1 \right) \quad (1)$$

Dokładne wyznaczenie impedancji pętli na podstawie zależności (1) wymaga spełnienia następujących warunków obwodu badanego:

- sinusoidalny kształt napięcia źródła  $E$  o stałej amplitudzie w czasie pomiaru,
- możliwość pomiaru geometrycznej różnicy obu napięć,
- liniowy obwód badany jest w stanie nieobciążonym, tak aby mierzone napięcie  $E$  było napięciem na zaciskach źródła,
- napięcie  $U$  mierzone jest w stanie ustalonym.

Żąda się również, aby prąd pomiarowy był możliwie duży. Ma to na celu wykrycie złych połączeń, zbliżenie pomiaru do rzeczywistych warunków zwarcia oraz zwiększenie dokładności pomiaru.

W praktyce spełnienie powyższych wymagań natrafia na poważne trudności i dlatego klasyczne metody pomiaru impedancji pętli  $Z$  wykorzystują zależność przybliżoną, otrzymaną przez zastąpienie wektorów napięć ich modułami, co ułatwia konstrukcję mierników.

$$Z_p = Z_0 \frac{E-U}{U} = Z_0 \left( \frac{E}{U} - 1 \right) \quad (2)$$

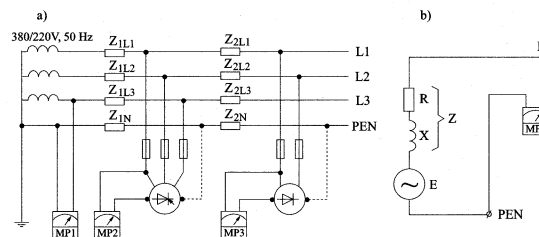
Niedokładność, wynikająca z zastąpienia wektorów ( $E$ ,  $U$ ) przez ich moduły ( $E$ ,  $U$ ) jest w świetle przepisów VDE [1] dopuszczalna, o ile obiekt badany charakteryzuje się argumentem impedancji nie większym niż  $18^\circ$ , co odpowiada  $\cos\phi > 0.95$ , przy czym  $\phi = \arctg(X/R)$ .

## 3. ANALIZA WPŁYWU ODKSZTAŁCEN KRZYWEJ NAPIĘCIA SIECI NA DOKŁADNOŚĆ POMIARU

### 3.1. Zagadnienia wstępne

W dotychczasowej literaturze dotyczącej pomiarów impedancji pętli zwarciowej nie spotyka się opracowań analizujących wpływ za-

wartości harmonicznych w krzywej napięcia na dokładność pomiaru. Zagadnieniami tymi autor zajmuje się od kilku lat; początkowo badany był wpływ odkształceń tylko dla mierników stosujących rezystancyjne obciążenie pomiarowe. W rozważaniach tych przyjęto, że nie występuje błąd od wahań i odchyłeń napięcia oraz od stanów przejściowych w obwodzie badanym. Liniowy obwód zastępczy badanej pętli pokazany na rys. 2b składa się z takich elementów jak: transformator, przewody fazowe i ochronne oraz odbiorniki zasilane przez energoelektroniczne przekształtniki. Rysunek 2a przedstawia rzeczywisty schemat sieci badanej z przykładowo oznaczonymi miejscami pomiaru MP1, MP2 i MP3. Zakłada się, że SEM źródła (380/220V, 50 Hz) jest sinusoidalna, a odkształcenie krzywej napięcia  $E$  w miejscu pomiaru pochodzi od obciążeń roboczych pobierających prądy odkształcone, które powodują spadki napięcia na impedancjach pętli. Należy podkreślić, że wybrano pewne warunki przykładowe, bowiem pełny opis analityczny nie jest możliwy z uwagi na bardzo dużą liczbę wielkości wpływających, które musiałyby być uwzględnione.



Rys. 2. Pomiar impedancji pętli zwarciowej w sieci o odkształconej krzywej napięcia a) rzeczywisty schemat sieci z trzema punktami pomiaru MP1, MP2 i MP3, b) schemat zastępczy obwodu badanego

### 3.2. Opis układu badanego

Badania wpływu odkształceń napięcia na błędy pomiaru impedancji pętli przeprowadzono dla wybranych typów napięcia oraz dla różnych wartości impedancji obwodu badanego. Założono, że w krzywej napięcia zasilającego występują jedynie trzecia ( $E_3$ ), piąta ( $E_5$ ) oraz siódma ( $E_7$ ) harmoniczne składowe o różnych wartościach współczynników udziału – (a, b, i c) oraz o różnych kątach fazowych początkowych ( $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7$ ). Inne harmoniczne mają mniejsze znaczenie, i będą w tych rozważaniach pominięte.

Obliczenia błędów pomiaru przeprowadzono dla wielu różnorodnych przypadków charakteryzujących warunki pomiaru i miejsce badania [9]. Przyjmuje się następujący opis wartości chwilowej napięcia  $e(t)$  przy otwartym łączniku  $W$

$$e(t) = \sqrt{2} E_1 [\sin(\omega t + \alpha_1) + a \sin(3\omega t + \alpha_3) + b \sin(5\omega t + \alpha_5) + c \sin(7\omega t + \alpha_7)] \quad (3)$$

gdzie:  $a = \frac{E_3}{E_1}$ ,  $b = \frac{E_5}{E_1}$ ,  $c = \frac{E_7}{E_1}$  – współczynniki udziału

Chwilowa wartość napięcia  $u(t)$  przy zamkniętym  $W$  dana jest

$$u(t) = \sqrt{2} [U_1 \sin(\omega t + \phi_{01} + \alpha_1 - \psi_1) + U_3 \sin(3\omega t + \phi_{03} + \alpha_3 - \psi_3) + U_5 \sin(5\omega t + \phi_{05} + \alpha_5 - \psi_5) + U_7 \sin(7\omega t + \phi_{07} + \alpha_7 - \psi_7)] \quad (4)$$

Kąty fazowe impedancji dla  $n$ -tej harmonicznej pętli ( $Z_n + Z_{0n}$ ) oraz impedancji obciążenia pomiarowego ( $Z_{0n}$ ) określają związki

$$\operatorname{tg} \psi_n = \frac{n(X+X_0)}{R+R_0} \quad \operatorname{tg} \phi_{0n} = \frac{nX_0}{R_0} \quad (5)$$

### 3.3. Dane do analizy

Do oceny dokładności metod i mierników impedancji pętli zwarciowej

ciowej stosowanych w sieciach o napięciu odkształconym należy określić parametry obwodu badanego.

### Napięcie w miejscu pomiaru

Dla uproszczenia obliczeń i ułatwienia interpretacji ich wyników zakłada się następującą wartość amplitudy harmonicznej podstawowej:  $A_1 = \sqrt{2} E_1 = 1V$  oraz jej fazowe przesunięcie początkowe:  $\alpha_1 = 0^\circ$ .

Przyjęto wartości liczbowe do opisu napięcia o dużym stopniu odkształcenia:

Typ B) krzywa wyostrzona (rys. 3a), współczynniki udziału:  $a = 0.3$ ,  $b = 0.15$ ,  $c = 0.1$  oraz fazy:  $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 180^\circ$

Otrzymano

$$e(t) = 1[\sin(\omega t) + 0.3\sin(3\omega t + 180) + 0.15\sin(5\omega t + 0) + 0.1\sin(7\omega t + 180)]$$

typ C) krzywa spłaszczona (rys. 4a), współczynniki:

$a = 0.3$ ,  $b = 0.15$ ,  $c = 0.1$  oraz fazy:  $\alpha_3 = 0^\circ$ ,  $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 0^\circ$

Otrzymano

$$e(t) = 1[\sin(\omega t) + 0.3\sin(3\omega t + 0) + 0.15\sin(5\omega t + 180) + 0.1\sin(7\omega t + 0)]$$

### Impedancja pętli zwarciowej

Wartość impedancji pętli zwarciowej zależy od miejsca przeprowadzenia pomiaru (rys. 2a). Impedancję pętli zwarciowej tworzą rezystancje i reaktancje dla składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej poszczególnych elementów pętli, przy czym impedancje dla składowej przeciwnej elementów statycznych sieci elektroenergetycznej np. transformatorów oraz linii napowietrznych i kablowych są równe impedancjom dla składowej zgodnej. Wartości impedancji zależne są od konstrukcji, układu połączeń i parametrów znamionowych elementów pętli. W praktyce moduł impedancji  $Z$  zawiera się w granicach od kilkunastu miliomów do kilku omów zaś jej kąt fazowy leży w zakresie od  $5^\circ$  do  $70^\circ$ . Na przykład w miejscu pomiaru MP1, rys. 2a (stacja transformatorowa) impedancja  $Z$  może wynosić od  $5 \text{ m}\Omega$  do  $1\Omega$  przy  $X/R > 1$ , natomiast w miejscu MP3 (instalacja mieszkaniowa) może być od  $0.3\Omega$  do  $3\Omega$ , a  $X/R > 0.2$ . Uwzględniając możliwość dogodnego porównywania wyników badań, przyjęto jedną wartość impedancji pętli  $Z = 1\Omega$  oraz sześć wartości jej argumentu:  $\phi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  i  $75^\circ$ .

### Impedancja obciążenia pomiarowego

W kraju i za granicą najczęściej używane są przyrządy posiadające rezystancyjne obciążenie pomiarowe  $Z_0 = R_0$  ( $\phi_0 = 0^\circ$ ). W większości klasycznych metod i przyrządów zmniejszenie błędu pomiaru wynikającego z różnicy kątów ( $\phi - \phi_0$ ) uzyskuje się przez stosowanie obciążenia pomiarowego o odpowiednio dobranej wartości kąta  $\phi_0$  [7,8].

W znanych rozwiązaniach wartości kąta  $\phi_0$  wynoszą: mierniki z jedną wartością kąta –  $\phi_0 = 0^\circ$  (MOZ, MZC 2, LT 5, PCL-4120A, PROFITEST 100S) i  $\phi_0 = 40^\circ$  (MZK) oraz mierniki z dwoma wartościami kąta –  $\phi_{01} = 15^\circ$  i  $\phi_{02} = 45^\circ$  (MR i MIZ).

Norma VDE 0413 [1], ze względu na dopuszczalny błąd pomiaru stanowi, iż różnica argumentów  $\phi$  i  $\phi_0$  nie powinna przekraczać  $15^\circ$ . Biorąc pod uwagę dane charakteryzujące produkowane mierniki impedancji pętli zwarciowej oraz wymagania przepisów, przyjęto trzy wartości impedancji obciążenia pomiarowego:  $Z_0 = 2\Omega$  (prąd „duży”),  $Z_0 = 10\Omega$  (prąd „średni”),  $Z_0 = 100\Omega$  (prąd „mały”) oraz pięć wartości jej argumentu:  $\phi_0 = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$

### 3.4. Różne rozwiązania metod pomiarowych

Z punktu widzenia wrażliwości na odkształcenia krzywej napięcia, znane klasyczne metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej można podzielić na dwie zasadnicze grupy, charakteryzujące się

odmiennymi właściwościami. Do pierwszej grupy zalicza się te rozwiązania, w których wynik pomiaru  $Z_{sk}$  otrzymuje się opierając się na wartościach skutecznych mierzonych napięć  $E$  oraz  $U$ . Należą do nich między innymi od dawna stosowane w praktyce odmiany tzw. „metody technicznej”, opartej na użyciu woltomierza i amperomierza, bądź tylko miernika napięcia przy zastosowaniu obciążenia pomiarowego o znanej wartości impedancji. Wcześniejsze odmiany metody technicznej polegały na wyznaczeniu rezystancji  $R$  i reaktancji  $X$  pętli przy stosowaniu najpierw rezystancyjnego  $R_0$  a następnie reaktancyjnego  $X_0$  obciążenia pomiarowego.

Drugą grupę stanowią szeroko stosowane mierniki specjalne, zawierające tyrystorowe łączniki pozwalające uzyskać krótkotrwały prąd pomiarowy o dużej wartości. Mierzona impedancję pętli  $Z_m$  otrzymuje się w oparciu o zapamiętane wartości maksymalne mierzonych napięć  $E_m$  i  $U_m$ . Ocena tych metod wymaga uprzedniego wyznaczenia wartości maksymalnej krzywej napięcia odkształconego  $e(t)$  jak i  $u(t)$  o założonym opisie matematycznym (3) i (4). Z pomocą odpowiedniego programu komputerowego MATHCAD obliczono wartości maksymalne odkształconych napięć  $E_m$  i  $U_m$  dla różnych typów krzywych [9].

Znając rzeczywistą wartość impedancji pętli  $Z$  oraz zmierzone wartości impedancji pętli  $Z_{sk}$  oraz  $Z_m$  można obliczyć procentowy błąd pomiaru  $Z_{sk}$  oraz  $Z_m$  na podstawie zależności

$$\delta Z_{sk} = \left[ \frac{Z_{sk} - Z}{Z} \right] 100\% = \left[ \frac{Z_0 \left( \frac{E}{U} - 1 \right)}{Z} \right] 100\% \quad \delta Z_m = \left[ \frac{Z_m - Z}{Z} \right] 100\% = \left[ \frac{Z_0 \left( \frac{E_m}{U_m} - 1 \right)}{Z} \right] 100\% \quad (6)$$

Gdzie skuteczne wartości mierzonych napięć: napięcia  $E$  – przy otwartym  $W$  oraz napięcia  $U$  – przy zamkniętym  $W$ , określają związki

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + E_7^2}, \quad U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + U_7^2} \quad (7)$$

gdzie:  $E_1, E_3, E_5, E_7$  oraz  $U_1, U_3, U_5, U_7$  – napięcia kolejnych harmonicznych przy otwartym i zamkniętym łączniku  $W$ .

### 3.5. Wyniki obliczeń i wykresy błędów pomiaru przy odkształconej krzywej napięcia

Przykładowe wyniki badań wpływu odkształceń napięcia na dokładność pomiaru impedancji pętli zwarciowej dla przyjętych danych obwodu zestawione są w tablicy 1 oraz przedstawione w postaci wykresów (rys. 3b i rys. 4b). Założono, że podczas pomiaru występują tylko błędy od odkształcenia krzywych oraz od różnicy argumentów obu impedancji.

Tablica 1. na następnym stronie

Obliczenia wartości błędów pomiaru przeprowadzono dla dwu typów deformacji krzywej napięcia opisanej zależnością (3):

typ B) z powiększeniem wartości maksymalnej (krzywa „wyostrzona”),

typ C) ze zmniejszeniem wartości maksymalnej (krzywa „spłaszczona”).

Dla obu typów krzywych amplitudy  $A_1, A_3, A_5$  i  $A_7$  występują w tym samym czasie, przy czym dla „wyostrzonej” wszystkie amplitudy mają jednakowy znak a dla „spłaszczonej” znak  $A_3$  jest przeciwny do pozostałych.

W tablicy 1 podane są wyniki obliczeń błędów pomiaru impedancji pętli zwarciowej  $\delta Z_{sk}$  oraz  $\delta Z_m$  według wartości skutecznych oraz maksymalnych mierzonych napięć dla krzywej wyostrzonej. Natomiast rys. 3a przedstawia przykładowy przebieg tej krzywej napięcia zawierającej  $\alpha_3, \alpha_5$  i  $\alpha_7$  składowe harmoniczne o danych wartościach współczynników  $a, b$  i  $c$  oraz różnych kątach początkowych  $\alpha_3, \alpha_5, \alpha_7$ . Na rys. 3b, pokazane są wykresy błędów  $\delta Z_{sk}$  i  $\delta Z_m$  w funkcji kąta impedancji pętli zwarciowej dla takiego typu

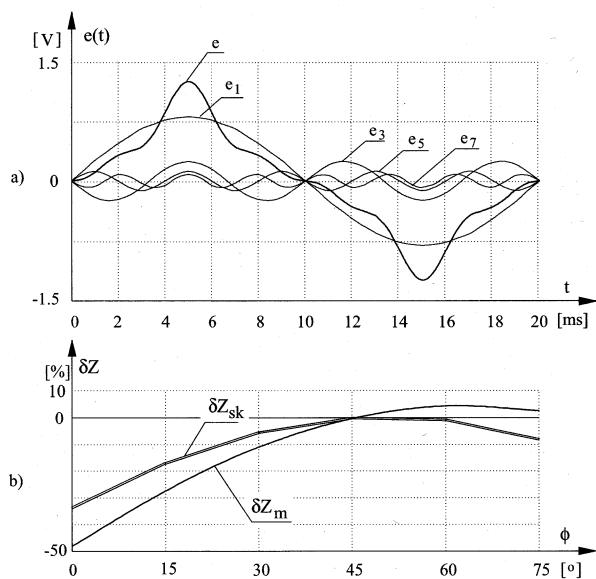
krzywej napięcia odkształconego oraz dla średnich wartości prądu pomiarowego: impedancja obciążenia pomiarowego  $Z_0 = 10\Omega$  oraz  $\phi_0 = 45^\circ$  przy impedancji pętli  $Z = 1\Omega$ .

Kąty fazowe impedancji		Prąd pomiarowy					
		duży		średni		mały	
		$Z_0 = 2\Omega$		$Z_0 = 10\Omega$		$Z_0 = 100\Omega$	
$\phi_0$	$\phi$	$\delta Z_{sk}$	$\delta Z_m$	$\delta Z_{sk}$	$\delta Z_m$	$\delta Z_{sk}$	$\delta Z_m$
0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0	15	-2.1	0.6	-3.1	-2.2	-3.4	-3.2
0	30	-8.6	-0.7	-12.1	-9.0	-13.3	-12.4
0	45	-19.4	-6.6	-26.6	-20.7	-29.0	-28.1
0	60	-34.5	-17.7	-45.9	-37.2	-49.6	-48.5
0	75	<b>-53.3</b>	<b>-34.0</b>	<b>-68.9</b>	<b>-58.3</b>	<b>-73.6</b>	<b>-72.3</b>
15	0	-2.9	-9.82	-3.67	-10.43	-3.92	-10.6
15	15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	30	-1.8	4.7	-2.6	4.1	-2.8	3.9
15	45	-8.3	4.1	-11.3	1.5	-12.2	0.8
15	60	-19.2	-1.7	-25.7	-7.7	-27.6	-9.0
15	75	<b>-34.4</b>	<b>-12.6</b>	<b>-44.9</b>	<b>-23.0</b>	<b>-47.8</b>	<b>-25.1</b>
30	0	-10.3	<b>-19.7</b>	-13.2	<b>-22.3</b>	-14.1	<b>-23.3</b>
30	15	-2.8	-7.6	-3.6	-8.3	-3.8	-8.6
30	30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	45	-1.9	3.0	-2.7	2.1	-3.0	1.9
30	60	-8.5	1.4	-11.5	-2.1	-12.5	-3.2
30	75	<b>-19.4</b>	-4.7	<b>-25.9</b>	-12.6	<b>-27.9</b>	-14.7
45	0	<b>-21.5</b>	<b>-28.3</b>	<b>-27.9</b>	<b>-35.7</b>	<b>-29.8</b>	<b>-38.2</b>
45	15	-9.8	-14.9	-12.8	-18.5	-13.8	-19.8
45	30	-2.6	-5.4	-3.4	-6.4	-3.7	-6.8
45	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	60	-2.1	1.5	-2.8	0.4	-3.1	0.0
45	75	-8.6	-1.2	-11.7	-5.4	-12.7	-6.6
60	0	<b>-36.5</b>	<b>-37.8</b>	<b>-47.1</b>	<b>-52.0</b>	<b>-50.2</b>	<b>-56.3</b>
60	15	-21.0	-22.8	-27.5	-31.7	-29.5	-34.5
60	30	-9.5	-11.5	-12.6	-15.8	-13.6	-17.2
60	45	-2.5	-3.9	-3.3	-5.0	-3.6	-5.4
60	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60	75	-2.1	0.2	-2.9	-0.9	-3.2	-1.3

Tablica 1. Błędy pomiaru  $\delta Z_{sk}$  i  $\delta Z_m$  dla wyostrzonej krzywej a  $= 0.1$ ;  $b = 0.05$ ;  $c = 0.03$ ;  $\alpha_3 = 180^\circ$ ;  $\alpha_5 = 0^\circ$ ;  $\alpha_7 = 180^\circ$ ;  $Z = 1\Omega$

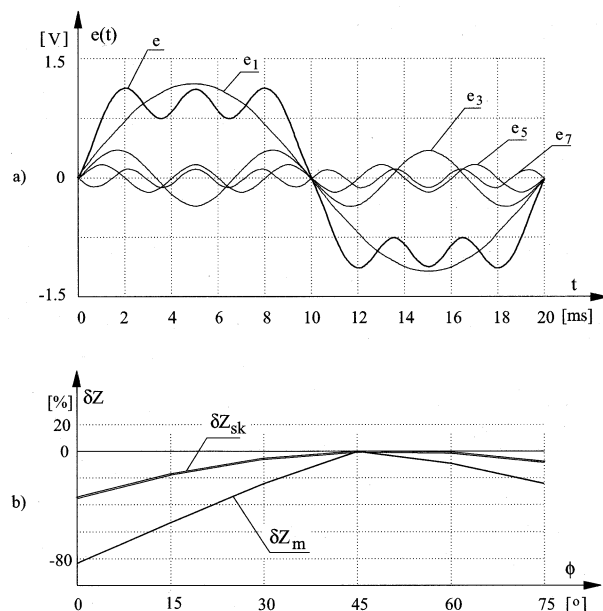
Z obliczeń błędów zamieszczonych w tablicy 1 wynika, że największe wartości błędów te osiągają przy stosowaniu mierników z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym dla  $Z_0 = 100\Omega$  i wynoszą: błąd wg mierzonych wartości skutecznych  $\delta Z_{sk} = -73.6\%$ , oraz wg wartości maksymalnych  $\delta Z_m = -72.3\%$ . Błędy  $\delta Z_{sk}$  oraz  $\delta Z_m$  mają różne wartości, a największe różnice między tymi błędami występują dla mierników stosujących duży prąd pomiarowy (małe  $Z_0$ ) i tak np.  $\delta Z_{sk} = -47.8\%$  oraz  $\delta Z_m = -25.1\%$  przy  $\phi_0 = 15^\circ$  oraz  $\phi = 75^\circ$ . Jak widać błędy pomiaru impedancji przekraczają wartości dopuszczalne w praktycznych warunkach przeprowadzania pomiaru.

Krzywa silnie spłaszczona napięcia nieobciążonego w miejscu pomiaru pokazana jest na rys. 4a. Rysunek 4b przedstawia przykładowe wykresy błędów pomiaru  $\delta Z_{sk}$  i  $\delta Z_m$  w funkcji zmian kąta  $\phi$  (miejsca przeprowadzania pomiaru) dla impedancji obciążenia  $Z_0 = 10\Omega$  i  $\phi_0 = 45^\circ$ . Jak wynika z badań przeprowadzonych przez autora [6], dla krzywej płaskiej przy tych samych zestawach argumentów obu impedancji, wyraźnie wzrastają wartości błędów  $\delta Z_m$  w stosunku do pomiarów przy krzywej wyostrzonej. Natomiast błędy wg wartości maksymalnych  $Z_{sk}$  dla tych samych zestawów argumentów mają takie same wartości.



Rys. 3. Błędy pomiaru impedancji pętli w funkcji kąta  $\phi$  przy wyostrzonej krzywej napięcia

a) dla:  $a = 0.3$ ,  $b = 0.15$ ,  $c = 0.1$ ;  $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_5 = 0^\circ$ ,  $\alpha_7 = 180^\circ$ ,  
b) wykresy  $\delta Z_{sk}$  i  $\delta Z_m$  dla:  $Z = 1\Omega$ ,  $Z_0 = 10\Omega$  i  $\phi_0 = 45^\circ$



Rys. 4. Błędy pomiaru impedancji pętli w funkcji kąta przy spłaszczonej krzywej napięcia

a) dla:  $a = 0.3$ ,  $b = 0.15$ ,  $c = 0.1$ ;  $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_5 = 0^\circ$ ,  $\alpha_7 = 180^\circ$ ,  
b) wykresy  $\delta Z_{sk}$  i  $\delta Z_m$  dla:  $Z = 1\Omega$ ,  $Z_0 = 10\Omega$  i  $\phi_0 = 45^\circ$

Największa różnica błędów ( $\delta Z_{sk} - \delta Z_m$ ) będąca miarą wpływu samych harmonicznych, występuje dla kąta  $\phi = 0^\circ$  oraz  $\phi_0 = 60^\circ$  i  $Z_0 = 100\Omega$ ; wtedy błędy wynoszą:  $\delta Z_{sk} = -60.2\%$ , a  $\delta Z_m = -88.9\%$ .

Z przeprowadzonych badań wynika, że największe wartości osiągają błędy pomiaru  $\delta Z_m$ , charakterystyczne dla powszechnie stosowanych mierników z impedancją  $Z_0$  o jednej wartości kąta  $\phi_0$ , np. dla  $\phi_0 = 0^\circ$  ( $Z_0 = R_0$ ) opartych na amplitudach mierzonych napięć. Mniejszy jest natomiast wpływ odkształcenia na błąd  $\delta Z_{sk}$ , jaki występuje w pomiarach impedancji wykorzystujących wartości skuteczne mierzonych napięć.

Błędy pomiaru impedancji można zmniejszyć przez regulację wartości argumentu  $\phi_0$ . Możliwe jest to do osiągnięcia w miernikach typu MR oraz MIZ opracowanych przez autora, które posiadają skokową regulację kąta impedancji obciążenia pomiarowego

$\phi_0$  [7,8,9]. W miernikach tych możliwe jest uzyskanie wymaganej przez przepisy [1] różnicy argumentów ( $\phi - \phi_0 < 15^\circ$ ), przy zachowaniu stałej wartości modułu impedancji obciążenia pomiarowego ( $Z_0 = \text{const}$ ).

#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania wpływu odkształcenia napięcia na dokładność różnych metod i mierników impedancji pętli zwarciowej wykazały, że wpływ odkształcenia zależy od rozwiązania miernika, parametrów obwodu badanego i stopnia odkształcenia.

Największe błędy pomiaru mają powszechnie stosowane metody i mierniki, w których wynik wyznacza się na podstawie amplitud mierzonych napięć. Błąd pomiaru sięga -70 %, a więc znacznie przekracza wartość dopuszczalną. Znacznie mniejszy jest natomiast wpływ odkształcenia napięcia na błąd pomiaru w przypadku metod opartych na pomiarze skutecznych wartości napięć, a więc dla niewygodnej w stosowaniu technicznej metody pomiaru impedancji pętli. Błąd pomiaru zależy zarówno od różnicy argumentów obu impedancji ( $\phi$  oraz  $\phi_0$ ) jak również od kształtu krzywej napięcia w miejscu badanym. Wykazano [4], że przy zrównaniu argumentu impedancji obciążenia pomiarowego do wartości argumentu impedancji pętli w pełni eliminuje się wpływ wszystkich harmonicznych występujących w krzywej napięcia badanego.

Błąd związany z odkształceniem krzywej napięcia powiększa znane błędy dodatkowe spowodowane: wahaniami i odchyleniami napięcia, różnicą argumentów impedancji pętli i obciążenia pomiarowego, wpływem stanów przejściowych oraz obciążen roboczych sieci.

Przedstawione wyniki analizy błędów pomiaru pozwolą na ocenę obecnie stosowanych klasycznych metod i przyrządów i mogą być przydatne przy pracach konstrukcyjnych nad nowymi rozwiązaniami mierników impedancji pętli zwarciowej.

#### Literatura

- [1] DIN 57413 Teil 3. *Deutsche Normen Schleifenwiderstands – Messgerate*,
- [2] Emanuel A., Janczak J., Pileggi D., Gulachenski E., Ropt C., Breen M., Gentile T.: *Voltage distortion in distribution feeders with nonlinear loads*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, nr 1, 1994.
- [3] Masny J.: *Pomiary impedancji pętli zwarciowej*. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 10, 1987.
- [4] Nawrocki Z., Stafiniak A.: *Analiza metrologiczna analogowego i cyfrowego miernika impedancji obwodu zwarciowego*. Przegląd Elektrotechniczny nr 10, 1999.
- [5] PN IEC 60364-4-41. *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona przeciwporażeniowa*. PKN 16.02.2000r.
- [6] Rosenberg W.: *VDE-Prüfung nach Forderung der VBG4-2, bearbeitete Auflage*. Berlin-Offenbach: VDE-Verlag GmbH. 1992.
- [7] Roskosz R.: *Przyrządy typu MR do pomiaru impedancji pętli zwarciowej*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 6, 1990.
- [8] Roskosz R., Sawicki J., Kurop Z., Szczepaniak M.: *Sposób i układ do automatycznego pomiaru modułu impedancji pętli zwarciowej*. Patent P-290383.
- [9] Roskosz R.: *Nowe rozwiązania pomiaru impedancji pętli zwarciowej przy odkształceniu krzywej napięcia w miejscu badania*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka, nr 79. Gdańsk 1999.
- [10] Zarządzenie nr 12, Prezesa Głównego Urzędu Miar z 30. 03.1999r. w sprawie wprowadzenia przepisów metrologicznych o miernikach oporu pętli zwarcia. Dziennik Urzędowy Miar i Probiernictwa Nr 3/99.
- [11] Winkler A., Lienenklaus E., Rontz A.: *Sicherheitstechnische Prüfungen in Elektrischen Anlagen mit Spannungen bis 1000V*. VDE-Schriftenreihe 47, VDE-Verlag, Berlin-Offenbach 1991.
- [12] Katalogi wybranych mierników impedancji pętli zwarciowej: AVO-MEGGER – LT5, EDGCUMBE – T16L240A, ELEKTRON – MZK-2, ERA – MOZ i MIZ, METRAWATT – P100S, KYORITSU – M4112, SAPEL – MR, SONEL – MZC-2.

## METROLOGIA

**Prof. dr hab. inż. Janusz Mindykowski** urodził się 22.07.1950 roku w Gdańsku, tam ukończył Technikum Mechaniczno-Elektryczne oraz studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej, specjalność: automatyka przemysłowo-okrętowa (1974). Na tym samym wydziale doktoryzował się (1981) w zakresie metrologii elektrycznej. W tej samej specjalności uzyskał stopień naukowy doktora habilitowanego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej (1993). Tytuł naukowy profesora nauk technicznych otrzymał 15 maja 2002 roku.



Od 1976 roku pracuje jako nauczyciel akademicki w Akademii Morskiej, przechodząc drogę od starszego asystenta do profesora nadzwyczajnego (1993).

W latach 1985-1990 był prodziekanem ds. dydaktycznych na Wydziale Elektrycznym Akademii Morskiej w Gdyni, w latach 1990-1993 Dziekanem tego Wydziału. W latach 1993-1996 pełnił funkcję Pełnomocnika Rektora ds. Badań Naukowych, w latach 1996-2002 Prorektora ds. Nauki. Od 1994 roku jest również kierownikiem Katedry Elektroenergetyki Okrętowej.

Działalność naukowa **Prof. Janusza Mindykowskiego** jest związana z szeroko rozumianą problematyką eksploatacji okrętowych

## NOMINACJE PROFESORSKIE

systemów technicznych i obejmuje takie zagadnienia, jak: przetworniki optoelektroniczne i ich aplikacje, układy mikroprocesorowe i ich wykorzystanie do pomiaru wielkości elektrycznych w elektroenergetyce okrętowej, ocenę jakości energii elektrycznej oraz pomiary wybranych wielkości nieelektrycznych, a zwłaszcza temperatur, w technice okrętowej.

Dorobek naukowy to 149 prac opublikowanych (56 zagranicznych), w tym 3 monografie, 4 podręczniki akademickie lub skrypty, 13 publikacji w czasopismach PAN-owskich lub z tzw. listy filadelfijskiej.

**Prof. Janusz Mindykowski** jest autorem bądź współautorem wielu rozwiązań z zakresu uprawianej specjalności, chronionych patentami (20 patentów i zgłoszeń patentowych) i wdrożonych do praktyki przemysłowej.

**Profesor Janusz Mindykowski** prowadzi aktywną działalność w licznych organizacjach i stowarzyszeniach naukowych oraz zawodowych – członek Fellow IEE od 1994, od 1996 Przewodniczący Regionu Gdańskiego IEE Poland. Od 1999 członek IEEE, a także członek IMEKO Technical Committee on Measurement of Electrical Quantities TC4, członek rzeczywisty Stowarzyszenia Tłumaczy Polskich, przewodniczący Komitetu Pomiarów oraz wiceprezes Polskiego Stowarzyszenia Pomiarów, Automatyki i Robotyki POLSPAR, członek Sekcji Kształcenia Komitetu Metrologii i Aparatury Pomiarowej PAN, w latach 1993-1996 oraz 1999-2002 członek sekcji Miernictwo Interdyscyplinarne i Elektrotechnika w Zespole T10 Komitetu Badań Naukowych.

**Prof. J. Mindykowski** odznaczony jest Srebrnym (1998) i Złotym Krzyżem Zasługi (1995). Posiada wiele innych odznaczeń i medali.