

ANNA GOLIJANEK-JĘDRZEJCZYK

BADANIE METODY  
POMIARU IMPEDANCJI  
PĘTLI ZWARCIOWEJ  
WYKORZYSTUJĄCEJ  
SKŁADOWE  
FAZORA NAPIĘCIA

POLITECHNIKA GDAŃSKA

*monografie*

*117*

POLITECHNIKA GDAŃSKA

ANNA GOLIJANEK-JĘDRZEJCZYK

BADANIE METODY  
POMIARU IMPEDANCJI  
PĘTLI ZWARCIOWEJ  
WYKORZYSTUJĄCEJ  
SKŁADOWE  
FAZORA NAPIĘCIA



GDAŃSK 2012

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Romuald Szymkiewicz*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

*Janusz T. Cieśliński*

REDAKTOR SERII

*Zbigniew Krzemiński*

RECENZENCI

*Zdzisław Nawrocki*

*Ryszard Roskosz*

PROJEKT OKŁADKI

*Jolanta Cieślawska*

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem  
[www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG](http://www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG)

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2012

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978–83–7348–404–7

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 5,9, ark. druku 6,75, 115/579

Druk i oprawa: *EXPOL* P. Rybiński, J. Dąbek, Sp. Jawna  
ul. Brzeska 4, 87-800 Włocławek, tel. 54 232 37 23

# SPIS TREŚCI

1. WSTĘP .....	7
2. WPROWADZENIE .....	9
2.1. Znaczenie pomiarów impedancji pętli zwarciowej .....	9
3. PRZEGLĄD ZNANYCH METOD I MIERNIKÓW DO POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ .....	12
3.1. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej .....	12
3.2. Czynniki wpływające na dokładność pomiaru impedancji pętli zwarciowej .....	14
3.2.1. Odształcenia napięcia .....	15
3.2.2. Obciążenia robocze sieci .....	17
3.2.3. Odchylenia i wahania napięcia .....	19
3.2.4. Stany przejściowe .....	21
3.2.5. Wpływ wartości prądu pomiarowego .....	22
3.2.6. Błąd fazowy .....	22
3.3. Metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej .....	23
3.3.1. Metoda stałoprądowa .....	24
3.3.2. Metoda techniczna z zastosowaniem własnego źródła zasilania .....	25
3.3.3. Metoda różnicowa .....	26
3.3.4. Metoda wektorowa z eliminacją wpływu obciążeń roboczych sieci .....	28
3.4. Podsumowanie przeglądu metod pomiaru impedancji .....	29
4. METODY POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI OPARTE NA WYZNACZENIU SKŁADOWYCH ORTOGONALNYCH FAZORA NAPIĘCIA .....	30
4.1. Metoda z przesunięciem $\psi$ .....	30
4.2. Metoda wektorowa .....	32
4.3. Analiza metrologiczna metody z przesunięciem $\psi$ .....	34
4.3.1. Źródła błędów wynikające z charakteru sieci i obwodu badanego .....	36
4.3.1.1. Odształcenie krzywej napięcia i parametry obwodu badanego .....	36
4.3.1.2. Obciążenie robocze sieci .....	39
4.3.2. Źródła błędów wynikające z parametrów miernika i stosowanej metody .....	41
4.3.2.1. Kąt fazowy badanej impedancji .....	42
4.3.2.2. Tolerancja wykonania rezystora obciążenia pomiarowego .....	42
4.3.2.3. Błąd pomiaru napięcia .....	42
4.3.2.4. Dokładność wyznaczenia okresu $T$ mierzonego napięcia .....	46
4.3.2.5. Dokładność pomiaru przesunięcia $\tau$ pomiędzy mierzonymi napięciami ..	49
4.4. Analiza metrologiczna metody wektorowej .....	51
4.4.1. Źródła błędów wynikające z charakteru obwodu badanego .....	52
4.4.1.1. Odształcenie krzywej napięcia i parametry obwodu badanego .....	52
4.4.1.2. Obciążenie robocze sieci .....	56
4.4.2. Źródła błędów wynikające z parametrów miernika i stosowanej metody .....	57
4.4.2.1. Kąt fazowy badanej impedancji .....	58
4.4.2.2. Tolerancja wykonania rezystora obciążenia pomiarowego .....	58
4.4.2.3. Błąd pomiaru napięcia .....	59
4.4.2.4. Dokładność wyznaczenia momentów czasowych .....	60
4.5. Podsumowanie przeprowadzonych analiz metrologicznych .....	61

5. FIZYCZNY MODEL MIERNIKA IMPEDANCJI PĘTLI .....	64
5.1. Struktura modelu miernika i obiektu badanego .....	64
5.1.1. Obiekt badany .....	64
5.1.2. Obciążenie pomiarowe .....	65
5.1.3. Układ pomiarowo-sterujący .....	65
5.2. Badania eksperymentalne modelu miernika impedancji pętli .....	68
5.3. Podsumowanie badań doświadczalnych miernika .....	72
6. UKŁAD DO WZORCOWANIA MIERNIKÓW IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ .....	74
6.1. Znane układy do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej .....	74
6.2. Modyfikacje układu do wzorcowania mierników impedancji pętli .....	77
6.2.1. Sprawdzanie miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem $\psi$ .....	80
6.2.2. Sprawdzanie miernika działającego w oparciu o metodę wektorową .....	81
6.3. Analiza metrologiczna zastosowanego układu do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej .....	82
6.3.1. Źródła błędów przy wzorcowaniu miernika wyznaczającego impedancję metodą z przesunięciem $\psi$ .....	83
6.3.1.1. Dokładność wykonania rezystorów $R_0$ i $R_D$ .....	84
6.3.1.2. Tolerancja wykonania wzorca impedancji .....	85
6.3.1.3. Dokładność pomiaru napięcia .....	85
6.3.1.4. Dokładność wyznaczenia przesunięcia $\tau$ .....	87
6.3.1.5. Dokładność wyznaczenia okresu $T$ napięcia .....	88
6.3.2. Źródła błędów przy wzorcowaniu miernika wyznaczającego impedancję metodą wektorową .....	88
6.3.2.1. Dokładność wykonania rezystorów $R_0$ i $R_D$ .....	89
6.3.2.2. Tolerancja wykonania wzorca impedancji .....	90
6.3.2.3. Dokładność pomiaru napięcia .....	90
6.3.2.4. Dokładność wyznaczenia momentów czasowych .....	91
6.4. Realizacja fizycznego układu do wzorcowania miernika impedancji pętli zwarciowej ...	92
6.5. Wyniki badań eksperymentalnych układu do wzorcowania .....	95
6.6. Podsumowanie badań symulacyjnych i eksperymentalnych układu do wzorcowania .....	96
6.6.1. Badania symulacyjne .....	96
6.6.2. Badania eksperymentalne .....	98
7. PODSUMOWANIE .....	99
BIBLIOGRAFIA .....	101
Streszczenie w języku polskim .....	105
Streszczenie w języku angielskim .....	106

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- $a_n$  – współczynnik udziału  $n$ -tej harmonicznej w stosunku do amplitudy składowej podstawowej
- $A$  – amperomierz
- $e(t)$  – wartość chwilowa napięcia w miejscu pomiaru przy otwartym łączniku W
- $E$  – wartość skuteczna napięcia w miejscu pomiaru przy otwartym łączniku W
- $E_b$  – składowa bierna fazona napięcia  $E$
- $E_c$  – składowa czynna fazona napięcia  $E$
- $E_{zn}$  – znamionowa wartość napięcia sieci
- $E_n$  – amplituda  $n$ -tej harmonicznej napięcia w miejscu pomiaru przy otwartym łączniku W
- $E_{sk}$  – skuteczna wartość napięcia krzywej odkształconej
- $E_z$  – źródło o sinusoidalnej SEM
- $f_p$  – częstotliwość próbkowania
- $i$  – indeks wartości chwilowej napięcia  $u[i]$
- $I$  – wartość skuteczna prądu
- $I_0$  – wartość skuteczna prądu pomiarowego przy otwartym łączniku W w sieci z obciążeniami roboczymi
- $I_1$  – wartość skuteczna prądu pomiarowego przy zamkniętym łączniku W w sieci z obciążeniami roboczymi
- $I_{1c}$  – składowa czynna fazona prądu przy zamkniętym łączniku W
- $I_{0c}$  – składowa czynna fazona prądu przy otwartym łączniku W
- $I_{0b}$  – składowa bierna fazona prądu przy otwartym łączniku W
- $I_{1b}$  – składowa bierna fazona prądu przy zamkniętym łączniku W
- $I_a$  – prąd zapewniający zadziałanie urządzenia ochronnego
- $I_d$  – prąd pojedynczego zwarcia przy pomijalnej impedancji między przewodem fazowym i częścią przewodzącą dostępną (obudową)
- $I_n$  – amplituda prądu  $n$ -tej harmonicznej
- $k$  – opóźnienie  $k = 1$
- $L_f$  – przewód fazowy, gdzie  $f = 1, 2, 3$
- $L$  – indukcyjność pętli
- $\text{Ł}_D$  – łącznik tyrystorowy załączający obciążenie pomiarowe członu dopełniającego
- $\text{Ł}_0$  – łącznik tyrystorowy załączający obciążenie pomiarowe miernika impedancji pętli
- $m$  – liczba okresów przepływu prądu pomiarowego
- $M$  – całkowita liczba spróbkowanych okresów  $T$  napięcia
- $n$  – rząd harmonicznej,  $n = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13$
- $N$  – całkowita liczba próbek napięcia przed i po załączeniu obciążenia pomiarowego
- $PEN$  – przewód ochronno-neutralny
- $R$  – rzeczywista wartość rezystancji pętli zwarcia
- $R_A$  – całkowita rezystancja uziomu i przewodu ochronnego łączącego części przewodzące dostępne z uziomem
- $R_0$  – rezystancja obciążenia pomiarowego
- $R_S$  – rezystancja obciążenia roboczego  $Z_S$
- $R_D$  – rezystancja członu dopełniającego
- $t$  – czas
- $t_1$  – chwila pobrania pierwszej wartości chwilowej napięcia
- $T$  – okres napięcia badanej sieci
- $T_A$  – czas jaki mija między wybranymi przejściami przez zero napięci  $e(t)$  i  $u(t)$
- $T_m$  – zmierzony okres napięcia
- $u(t)$  – wartość chwilowa napięcia w miejscu pomiaru przy zamkniętym łączniku W
- $U$  – wartość skuteczna napięcia w miejscu pomiaru przy zamkniętym łączniku W

- $U_0$  – wartość skuteczna napięcia odkształconego  
 $U_1$  – wartość skuteczna napięcia w miejscu pomiaru w obwodzie z obciążeniem roboczym przy zamkniętym łączniku W  
 $U_{1c}$  – składowa czynna fazora napięcia przy zamkniętym łączniku W  
 $U_{0c}$  – składowa czynna fazora napięcia przy otwartym łączniku W  
 $U_{0b}$  – składowa bierna fazora napięcia przy otwartym łączniku W  
 $U_{1b}$  – składowa bierna fazora napięcia przy zamkniętym łączniku W  
 $U_X$  – spadek napięcia na reaktancji pętli zwarcia X  
 $U_R$  – spadek napięcia na rezystancji pętli zwarcia R  
 $U_b$  – składowa bierna fazora napięcia U  
 $U_c$  – składowa czynna fazora napięcia U  
 $U_Z$  – spadek napięcia na impedancji pętli Z  
 $U_0$  – napięcie względem ziemi  
 $U_n$  – amplituda  $n$ -tej harmonicznej napięcia w miejscu pomiaru przy zamkniętym łączniku W  
 $U_{sk}$  – skuteczna wartość napięcia w miejscu pomiaru przy zamkniętym łączniku W  
W – wyłącznik  
X – rzeczywista wartość reaktancji pętli zwarcia  
 $X_S$  – reaktancja obciążenia roboczego  $Z_S$   
V – woltomierz  
Z – rzeczywista wartość impedancji pętli zwarcia  
 $Z_m$  – zmierzona wartość impedancji pętli zwarcia  
 $Z_0$  – impedancja obciążenia pomiarowego  
 $Z_{obciąż}$  – zmierzona impedancja pętli przy występujących obciążeniach roboczych  
 $Z_\psi$  – impedancja uzyskana metodą z przesunięciem  $\psi$   
 $Z_w$  – metoda uzyskana metodą wektorową  
 $Z_{wz}$  – impedancja wzorcowa w układzie do wzorcowania pomiarowej  
 $Z_S$  – impedancja obciążenia roboczego  
 $\alpha_n$  – kąt początkowy składowych harmonicznych  
 $\delta Z_A$  – błąd impedancji pętli wynikający z charakteru sieci zasilającej, wyznaczony teoretycznie  
 $\delta Z_B$  – błąd impedancji pętli wynikający z budowy miernika i metody, wyznaczony teoretycznie  
 $\delta Z_C$  – całkowity błąd impedancji pętli, wyznaczony teoretycznie  
 $\delta Z_m$  – błąd pomiaru impedancji pętli  
 $\delta Z_\phi$  – błąd fazowy pomiaru impedancji pętli  
 $\delta Z_{obciąż}$  – błąd pomiaru impedancji pętli wynikający z sąsiedztwa obciążenia roboczego  
 $\delta Z_{odch}$  – błąd pomiaru impedancji pętli wynikający z odchylenia krzywej napięcia  
 $\delta Z_{odksz}$  – błąd pomiaru impedancji pętli wynikający z odkształcenia krzywej napięcia  
 $\delta Z_{wah}$  – błąd pomiaru impedancji pętli wynikający z wahań krzywej napięcia  
 $\Delta E$  – błąd pomiaru napięcia w miejscu pomiaru przy otwartym łączniku W  
 $\Delta E_{odch}$  – odchylenie napięcia  
 $\Delta E_w$  – błąd pomiaru napięcia w miejscu pomiaru przy otwartym łączniku W, uwzględniany przy wyznaczeniu impedancji metodą wektorową  
 $\Delta E_\psi$  – błąd pomiaru napięcia w miejscu pomiaru przy otwartym łączniku W uwzględniany przy wyznaczeniu impedancji metodą z przesunięciem  $\psi$   
 $\Delta U_\psi$  – błąd pomiaru napięcia w miejscu pomiaru przy zamkniętym łączniku W, przy wyznaczeniu impedancji metodą z przesunięciem  $\psi$   
 $\phi$  – argument impedancji pętli zwarcia Z  
 $\phi_0$  – argument impedancji obciążenia pomiarowego  $Z_0$   
 $\phi_S$  – argument obciążenia roboczego  $Z_S$   
 $\lambda$  – część ostatniego spróbkowanego okresu napięcia,  $\lambda \in \langle 0, 1 \rangle$   
 $\tau$  – czas przesunięcia między napięciami  $e(t)$  przed i  $u(t)$  po załączeniu obciążenia pomiarowego  $R_0$   
 $\omega$  – pulsacja przebiegu o okresie T  
 $\psi$  – kąt fazowy obwodu badanego dla składowej podstawowej

## Rozdział 1

### WSTĘP

Książka dotyczy pomiarów impedancji pętli zwarciowej w układach elektroenergetycznych niskiego napięcia. Tematyka ta jest ciągle ważna i stale rozwijana ze względu na fakt, iż związana jest z bezpieczeństwem użytkowania urządzeń elektrycznych.

Na podstawie literatury, dokonano krytycznej analizy metrologicznej wybranych metod pomiaru impedancji pętli oraz mierników, w których zastosowano te metody.

Przeprowadzono szczegółowe badania symulacyjne metod pomiaru impedancji pętli oparte na pomiarze składowych ortogonalnych napięcia, czyli metody z przesunięciem  $\psi$  i metody wektorowej. Wyniki tych analiz pozwoliły sprecyzować zasady wyboru metody pomiarowej w zależności od miejsca pomiaru, jak również dały podstawy do konstrukcji miernika impedancji pętli umożliwiającego pomiar zarówno metodą z przesunięciem  $\psi$  jak i metodą wektorową.

Zaprezentowano również układ do wzorcowania mierników działających zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$  oraz metodą wektorową.

Rozdział drugi wprowadza w tematykę z podkreśleniem znaczenia pomiarów impedancji pętli zwarciowej.

Zasadę pomiaru impedancji pętli zwarciowej, czynniki wpływające na dokładność pomiaru impedancji oraz przegląd wybranych metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym opisano w rozdziale trzecim.

W rozdziale czwartym pracy przedstawiono zasady pomiaru impedancji pętli metodą z przesunięciem  $\psi$  i metody wektorowej oraz dokonano analizy metrologicznej obu tych metod. Sprawdzono wrażliwość każdej z tych dwóch metod pomiaru na czynniki związane z charakterem sieci i badanym obwodem, takie jak: odkształcenie krzywej napięcia i obciążenia robocze sieci. Sprawdzono również, które parametry miernika realizującego pomiar impedancji pętli metodą z przesunięciem  $\psi$  i metodą wektorową decydująco wpływają na dokładność pomiaru. Rezultaty zaprezentowanych w tym rozdziale badań są wynikami symulacji komputerowych przeprowadzonych w programie MathCad.

Rozdział piąty zawiera opis zbudowanego przez autorkę książki miernika wyznaczającego impedancję pętli obiema badanymi metodami. W rozdziale tym przedstawiono także wyniki badań eksperymentalnych miernika oraz dokonano weryfikacji rezultatów uzyskanych z doświadczenia z wynikami symulacji komputerowych z rozdziału czwartego.

W rozdziale szóstym przedstawiono problematykę wzorcowania mierników rezystancji i impedancji pętli, opisano stosowane układy do sprawdzania tych mierników oraz przedstawiono nowy, opatentowany sposób i układ do wzorcowania mierników impedancji pętli, działających zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$  i metodą wektorową.

W rozdziale tym przeprowadzono również analizę metrologiczną zmodyfikowanego układu do wzorcowania, która daje podstawy do konstrukcji systemu do sprawdzania mierników impedancji pętli realizujących pomiar impedancji zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$  i metodą wektorową.

Przedstawiono budowę i opis działania zbudowanego układu do wzorcowania mierników impedancji pętli oraz wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych tego układu.



Tematyka, zawarta w niniejszej książce, została początkowo opracowana jako praca doktorska, realizowana przez autorkę w latach 2001–2006 pod promotorstwem dr hab. inż. Ryszarda Roskosza, prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej, a w końcowej fazie – dr hab. inż. Leona Swędrowskiego, prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej. Autorka serdecznie dziękuje Panu dr hab. inż. Ryszardowi Roskoszowi za zainspirowanie tą tematyką oraz za udzielone rady i sugestie. Badania przeprowadzono na Politechnice Gdańskiej, w Katedrze Metrologii i Systemów Informacyjnych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki.

Książkę recenzowali: prof. dr hab. inż. Zdzisław Nawrocki z Politechniki Wrocławskiej oraz dr hab. inż. Ryszard Roskosz, prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej, którym autorka serdecznie dziękuje za wnikliwe i życzliwe recenzje.

## Rozdział 2

# WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych parametrów charakteryzującym sieci elektroenergetyczne jest impedancja oraz jej składowe ortogonalne – rezystancja i reaktancja. Parametry te określają warunki zwarciove oraz napięciowe w danym punkcie sieci.

Problematyka związana z pomiarami impedancji pętli w układach elektroenergetycznych niskiego napięcia jest ważna i aktualna głównie ze względu na bezpośredni związek z zagadnieniami dotyczącymi bezpieczeństwa związanego z użytkowaniem urządzeń elektrycznych. Zmierzona wartość impedancji pętli stanowi podstawowe kryterium oceny ochrony przeciwporażeniowej. Szczególnie niebezpieczne są ujemne błędy pomiaru, które mogą spowodować, że do ruchu zostaną dopuszczone urządzenia o nieskutecznej ochronie.

Mierniki impedancji pętli zwarciovej stosuje się do sprawdzania skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w sieciach niskiego napięcia [25, 73]. Obecnie istnieją coraz większe możliwości techniczne, pozwalające na rozwój metod i przyrządów do pomiaru impedancji pętli zwarciovej. Polegają one głównie na powszechnym wykorzystaniu elementów energoelektronicznych oraz mikroprocesorów w układach sterujących i pomiarowych [5, 50–52, 58, 62, 64, 67, 79, 80].

Dotychczas opracowano i wdrożono w formie komercyjnych rozwiązań szereg metod pomiaru impedancji pętli. Nadal pojawiają się jednakże problemy z osiągnięciem pożądanej dokładności pomiaru, szczególnie w przypadku badania małych wartości impedancji. Dodatkowym źródłem błędów pomiarów może być stosowanie niewłaściwych procedur wzorcowania miernika. Znane układy i urządzenia do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciovej mają ograniczenia wynikające ze skończonej wartości impedancji wewnętrznej źródeł zasilania.

### 2.1. Znaczenie pomiarów impedancji pętli zwarciovej

Głównym wymogiem technicznym stawianym urządzeniom oraz instalacjom elektroenergetycznym, poza sprawnym działaniem, jest skuteczność ochrony przeciwporażeniowej, której zadaniem jest szybkie wykrywanie uszkodzeń czy zwarć oraz likwidowanie zagrożeń (samoczynne wyłączenie zasilania, selektywne uruchamianie zabezpieczeń).

Ochrona przez samoczynne wyłączenie zasilania w danym obwodzie powinna być wykonana tak, aby w przypadku zwarcia, pomiędzy częścią czynną a częścią przewodzącą (np. obudową urządzenia) lub przewodem ochronnym, spodziewane napięcie dotykowe o wartości większej niż 120 V prądu stałego lub 50 V prądu przemiennego było wyłączane na tyle szybko, by nie wystąpiły niebezpieczne dla człowieka skutki patofizjologiczne.

W tym celu powinna zostać stworzona odpowiednia droga dla prądu zwarciowego – pętla zwarcia – złożona z przewodów fazowych oraz ochronnych – łączących wszystkie dostępne części przewodzące urządzeń elektrycznych z punktem neutralnym sieci lub z ziemią, w zależności od układu sieciowego. Samoczynne wyłączenie zasilania realizują urządzenia ochrony przetężeniowej (bezpieczniki z wkładkami topikowymi, wyłączniki z wyzwalaczami nadprądowymi, elektromagnetycznymi) lub urządzenia ochronne różni-

cowoprądowe (wyłączniki ochronne różnicowoprądowe, wyłączniki współpracujące z przekąźnikami różnicowoprądowymi). Ocena skuteczności samoczynnego wyłączenia w danej, sprawdzanej instalacji bądź odbiorniku polega na porównaniu zmierzonej wartości impedancji obwodu zwarciego z wartością dopuszczalną impedancji tego obwodu przy dopuszczalnym czasie samoczynnego wyłączenia.

W układzie sieciowym typu TN w celu zapewnienia samoczynnego szybkiego wyłączenia zasilania spełnione powinno być wymaganie [41]:

$$Z \leq \frac{U_o}{I_a}, \quad (2.1)$$

gdzie:  $I_a$  - prąd zapewniający zadziałanie urządzenia ochronnego (wyłącznika lub bezpiecznika).

W zależności od stosowanego urządzenia, jest to prąd przetężeniowy bądź różnicowy.

$U_o$  - napięcie względem ziemi.

W układzie sieci TT ochrona przez samoczynne wyłączenie zasilania będzie skuteczna wówczas, gdy napięcie dotykowe na dostępnej części przewodzącej nie przekroczy 50 V [41], czyli:

$$R_A I_a \leq 50 \text{ V}, \quad (2.2)$$

gdzie:  $R_A$  - całkowita rezystancja uziomu i przewodu ochronnego łączącego części przewodzące dostępne z uziomem.

Natomiast w układzie sieci IT powinno być spełnione wymaganie [41]:

$$R_A I_d \leq 50 \text{ V}, \quad (2.3)$$

gdzie:  $I_d$  - prąd pojedynczego zwarcia przy pomijalnej impedancji między przewodem fazowym i częścią przewodzącą dostępną (obudową).

W czasie zwarcia uszkodzeniu mogą ulec również urządzenia. W związku z tym zabezpieczenia powinny zostać tak zaprojektowane, aby uszkodzeniu uległy jedynie urządzenia w miejscu zwarcia, natomiast poza nim w torze przepływu prądu zwarciego nie powinno dojść do żadnych uszkodzeń. Spełnienie tego warunku wymaga doboru i wymiarowania wszystkich elementów o określonej wytrzymałości zwarciowej oraz urządzeń ochrony przeciwporażeniowej (odłączników, bezpieczników, wyłączników ochrony przetężeniowej oraz urządzeń różnicowoprądowych) o odpowiedniej zdolności wyłączenia.

Przy doborze zabezpieczeń istotne jest ich selektywne (wybiórcze) działanie. W przypadku wystąpienia zwarcia powinno zadziałać tylko zabezpieczenie znajdujące się najbliżej miejsca uszkodzenia w kierunku źródła zasilania, bowiem zadziałanie szeregowe może być przyczyną niepotrzebnych i kosztownych wyłączeń. Dobór odpowiednich zabezpieczeń powinien być przeprowadzany na podstawie znajomości największych prądów zwarciowych, jakie mogą popłynąć w danym obwodzie [22, 45] oraz w oparciu o charakterystyki czasowo-prądowe zabezpieczeń podawane przez producentów.

Znajomość impedancji linii zasilającej jest istotna również z punktu widzenia jakości energii elektrycznej [56, 68]. Stosowanie coraz powszechniej nieliniowych odbiorników powoduje pogorszenie jakości energii w sieciach elektrycznych. Dostawcy energii elektrycznej, jak również i przede wszystkim wielcy odbiorcy w celu poprawy jakości napięcia powinni przedsięwziąć stosowne działania techniczne i organizacyjne.

Jednym z najprostszych działań jest ustalenie i wydzielenie odbiorników o dużych mocach znamionowych, które pobierają silnie odkształcony prąd, oraz zasilanie ich z osobnych obwodów. Inne rozwiązanie może polegać na poprawie jakości napięcia dzięki

---

zastosowaniu filtrów pasywnych, aktywnych bądź hybrydowych. W celu prawidłowego zaprojektowania filtra pasywnego wymagana jest znajomość wartości impedancji sieci zasilającej. Do wykonania filtra aktywnego niezbędna zaś będzie znajomość parametrów instalacji eklektycznej [68]. Dlatego informacja o parametrach impedancji linii zasilającej instalacji elektrycznej jest tak istotna.

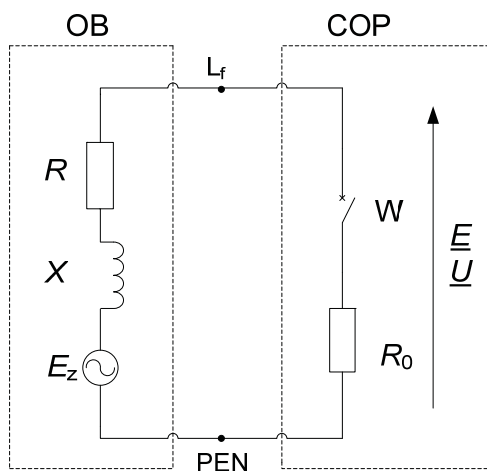
## Rozdział 3

# PRZEGLĄD ZNANYCH METOD I MIERNIKÓW DO POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ

W rozdziale tym została przedstawiona zasada pomiaru impedancji pętli zwarcia oraz przeanalizowano wpływ występujących w sieciach niskiego napięcia czynników na dokładność pomiaru impedancji. Dokonano również przeglądu znanych z literatury i stosowanych metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym.

### 3.1. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej

Większość znanych i stosowanych powszechnie metod pomiarowych impedancji pętli zwarciowej  $\underline{Z} = R + jX$  wykorzystuje zasadę sztucznego zwarcia, podczas którego na podstawie pomiaru spadków napięcia wywołanego przepływem prądu wyznacza się impedancję pętli (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej  $Z$  [56]:  
OB – obiekt badany, COP – człon obciążenia pomiarowego

Zakłada się, że źródło  $E_z$  generuje sinusoidalne napięcie oraz że impedancja pętli składa się z szeregowego połączenia elementów zastępczych: rezystancji  $R$  i reaktancji indukcyjnej  $X$ . Moduł impedancji  $Z$  określa zależność:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (3.1)$$

a jej składowe, rezystancyjna  $R$  i reaktancyjna  $X$  odpowiednio dane są wzorami:

$$R = Z \cos \phi, \quad (3.2)$$

$$X = Z \sin \phi, \quad (3.3)$$

gdzie:  $\phi$  – argument impedancji pętli zwarcia, określony jako  $\phi = \arctg \frac{X}{R}$ .

Dokładne wyznaczenie impedancji pętli zwarciowej polega na pomiarze dwu fazorów napięć:  $\underline{U}$  i  $\underline{E}$ , które występują odpowiednio przy włączonym i wyłączonym rezystancyjnym obciążeniu pomiarowym  $R_0$ .

Po załączeniu obciążenia pomiarowego  $R_0$  fazor napięcia  $\underline{U}$  w miejscu pomiaru można opisać następującą zależnością:

$$\underline{U} = \underline{E} \frac{R_0}{\underline{Z} + R_0}, \quad (3.4)$$

Po przekształceniach szukaną wartość impedancji  $\underline{Z}$  określa następująca zależność:

$$\underline{Z} = R_0 \left( \frac{\underline{E}}{\underline{U}} - 1 \right), \quad (3.5)$$

W celu dokładnego pomiaru impedancji pętli zwarciowej, zgodnie z zależnością (3.5) w obwodzie (rys. 3.1), powinny zostać spełnione następujące warunki [56]:

- napięcie źródła  $E$  powinno mieć sinusoidalny kształt o stałej amplitudzie w czasie pomiaru,
- powinna istnieć możliwość pomiaru geometrycznej różnicy obu napięć,
- liniowy obwód badany jest w stanie nieobciążonym, dzięki czemu mierzone napięcie  $\underline{E}$  przed załączeniem obciążenia pomiarowego jest napięciem na zaciskach źródła,
- spadek napięcia  $\underline{U}$  na obciążeniu pomiarowym  $R_0$  należy zmierzyć w stanie ustalonym.

Niestety, w praktyce trudno spełnić wyżej wymienione warunki, ponieważ przede wszystkim napięcie  $\underline{E}$  przed i napięcie  $\underline{U}$  po załączeniu obciążenia pomiarowego nie występują jednocześnie. Poza tym, iloraz napięć we wzorze (3.5) dotyczy liczb zespolonych. Oprócz tego w badanym obwodzie mogą występować wahania i odchylenia napięcia, stany przejściowe wywołane pracą innych urządzeń elektrycznych oraz załączania obciążenia pomiarowego. Również krzywa napięcia w miejscu pomiaru impedancji pętli może być odkształcona na skutek pracy odbiorników nieliniowych.

Ze względu na wymienione trudności techniczne pomiaru geometrycznej różnicy napięć, znane klasyczne metody pomiaru impedancji pętli wykorzystują zależność przybliżoną, w której fazory napięć zastąpiono ich modułami:

$$Z_m = R_0 \left( \frac{E}{U} - 1 \right), \quad (3.6)$$

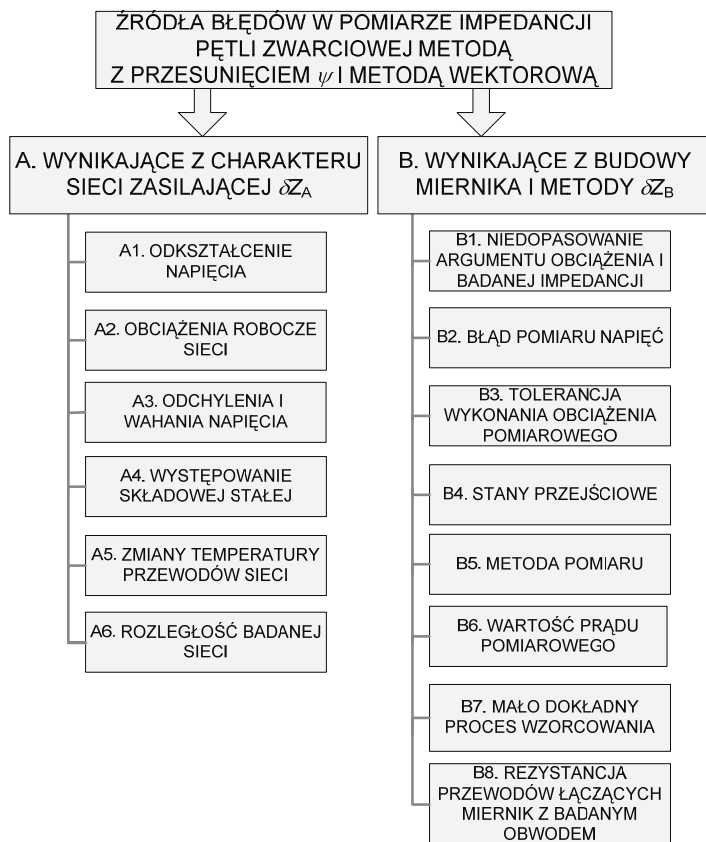
Występuje wówczas błąd pomiaru  $\delta Z_m$  obliczany ze znanego wzoru [56]:

$$\delta Z_m = \frac{Z_m - Z}{Z} \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

gdzie:  $Z$  – rzeczywista wartość impedancji pętli zwarcia,  
 $Z_m$  – zmierzona wartość impedancji pętli zwarcia.

### 3.2. Czynniki wpływające na dokładność pomiaru impedancji pętli zwarciowej

Na dokładność pomiaru impedancji pętli zwarciowej mają wpływ czynniki wynikające z niedeterministycznego charakteru sieci zasilającej oraz budowy miernika i metody, według której on działa [5, 56, 63] (rys. 3.2).



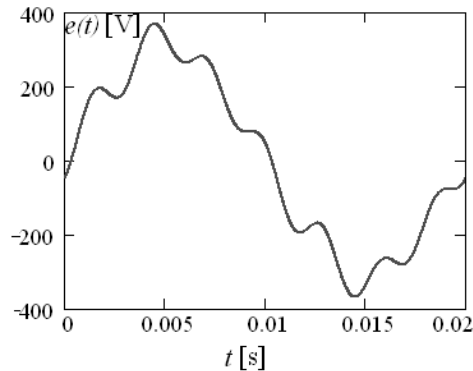
Rys. 3.2. Czynniki wpływające na dokładność pomiaru impedancji pętli

Nie przeprowadzono analizy czynników od A3 do A6 i B8, ze względu na przyjęte następujące założenia:

- czas pomiaru nie przekracza kilku okresów napięcia źródłowego,
- odbiorniki w badanym obwodzie są liniowe i symetryczne,
- czas sztucznego zwarcia jest krotnością okresu napięcia źródłowego,
- temperatura przewodów badanej sieci nie zmienia się w trakcie pomiarów,
- sieć elektryczną w modelu stanowi szeregowe połączenie źródła napięcia i impedancji elementów pętli, obciążeń roboczych oraz impedancji obwodu ziemnopowrotnego (rys. 3.1).

### 3.2.1. Odształcenia napięcia

Chwilowy przebieg napięcia prądu przemiennego powinien być sinusoidalny, jednakże w rzeczywistości przebieg ten jest w różnym stopniu odształcony (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Przykładowy przebieg krzywej odształconej w miejscu pomiar impedancji pętli  

$$e(t) = \sqrt{2} \cdot 230 [\sin(\omega t) + 0,03 \sin(3\omega t + 180) + 0,05 \sin(5\omega t) + 0,15 \sin(7\omega t - 90)]$$

Odształcenia napięcia spowodowane są głównie stosowaniem odbiorników nieliniowych. Pobierany wówczas prąd nie ma takiego samego kształtu jak napięcie zasilania. Do odbiorników nieliniowych należą: przekształtniki, spawarki, piece łukowe, lampy wyładowcze, piece prostownicze, a także sprzęt biurowy (komputery, faksy, kserokopiarki, układy zasilania awaryjnego) i domowy (telewizory, kuchenki mikrofalowe).

Najczęściej stosowanymi przekształtnikami są przekształtniki 6-pulsowe, które generują harmoniczne o następujących liczbach porządkowych: 5, 7, 9, 11, 13, 17, 19, 23, 25. Przekształtniki 12-pulsowe generują te same harmoniczne z wyłączeniem 5 i 7 harmonicznej, lecz znacznie wyższy jest koszt ich wykonania, a w związku z tym są rzadziej stosowane.

Stopień odształcenia napięcia zależy od wartości impedancji pętli w miejscu badania oraz od względnego udziału odbiorników nieliniowych w obciążeniu roboczym sieci.

Dla oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej wyznacza się impedancję pętli zwarciowej  $Z$  odniesioną do podstawowych składowych napięcia i prądu. Prąd zwarciowej w miejscu pomiaru przy sinusoidalnym napięciu ma mniejszą wartość niż prąd zwarciowej występujący w tym samym miejscu przy napięciu odształconym.

Zgodnie z normą [42] współczynnik  $THD$  – odształcenia harmonicznymi napięcia rozumiany jako:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{40} E_n^2}{E_{sk}^2}} \cdot 100\% , \quad (3.8)$$

gdzie:  $E_n$  – skuteczna wartość napięcia  $n$ -tej harmonicznej,

$E_{sk}$  – skuteczna wartość napięcia składowej podstawowej.



Współczynnik THD sieciach niskiego napięcia nie powinien przekraczać 8%. Wartości dopuszczalne dla poszczególnych rzędów od 2÷25, wyrażone w procentach  $E_{zn}$  zostały zestawione w tab. 3.1, zgodnie z którą w normalnej pracy sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia wartość dopuszczalna dla harmonicznym nieparzystych nie powinna przekraczać 6%, natomiast dla harmonicznym parzystych – 2%.

**Tablica 3.1**

Wartości poszczególnych harmonicznym napięcia w złączu sieci elektroenergetycznej odbiorcy dla rzędów do 25,  $E_{zn}$  [%] [42]

L.p.	Nieparzyste harmonicznym				Parzyste harmonicznym	
	nie będące krotnością 3		będące krotnością 3		rzęd $n$	względna wartość napięcia
	rzęd $n$	względna wartość napięcia	rzęd $n$	względna wartość napięcia		
1.	5	6%	3	5%	2	2%
2.	7	5%	9	1,5%	4	1%
3.	11	3,5%	15	0,5%	6...24	0,5%
4.	13	3%	21	0,5%		
5.	17	2%				
6.	19	1,5%				
7.	23	1,5%				
8.	5	6%	3	5%	2	2%

Błąd spowodowany pomiarami impedancji pętli w sieciach o napięciu odkształconym  $\delta Z_{\text{odks}}$  rozumiany jest jako różnica pomiędzy impedancją zmierzoną, w przypadku gdy krzywa napięcia jest odkształcona  $Z_{\text{odks}}$ , a impedancją pętli  $Z$  wyznaczoną, gdy napięcie zasilania jest sinusoidalne, zgodnie ze wzorem:

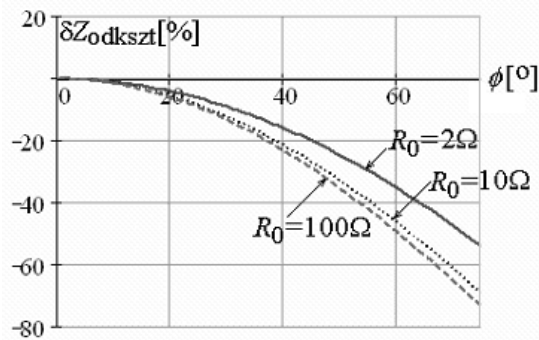
$$\delta Z_{\text{odks}} = \frac{Z_{\text{odks}} - Z}{Z} \cdot 100\% , \quad (3.9)$$

Na rysunku 3.4 przedstawiono wartości błędu  $\delta Z_{\text{odks}}$  w funkcji argumentu pętli  $\phi$ , dla różnych wartości prądu pomiarowego (przyjmując współczynnik odkształcenia napięcia na poziomie 8%). Założono, że w krzywej napięcia zasilającego występują jedynie następujące składowe: 3, 5, 7, 9, 11, 13 o różnych wartościach udziału ( $a_3, a_5, a_7, a_9, a_{11}, a_{13}$ ) oraz różnych kątach fazowych początkowych ( $\alpha_3, \alpha_5, \alpha_7, \alpha_9, \alpha_{11}, \alpha_{13}$ ).

Jak widać, w przypadku pomiaru impedancji pętli metodami klasycznymi z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym błąd pomiaru impedancji  $\delta Z_{\text{odks}}$  może znacznie przewyższać wartość dopuszczalną, która według przepisów [8, 78] nie powinna przekraczać  $\pm 30\%$  (błąd według normy [78] rozumiany jako maksymalny błąd roboczy).

Szczegółowe wyniki badań wpływu odkształconej krzywej napięcia sieci na dokładność pomiaru impedancji pętli zwarciowej metodami klasycznymi można znaleźć w pracy [56]. Jak wynika z tych badań, największe błędy pomiaru impedancji pętli występują w miernikach, w których impedancji wyznaczana jest na podstawie amplitud mierzonych napięć i w niektórych przypadkach błąd ten może osiągnąć nawet  $-70\%$ , a tym samym znacznie przekroczyć wartość dopuszczalną przez normy. W przypadku pomiaru impedancji pętli sposobami opartymi o wyznaczenie impedancji na podstawie skutecznych wartości

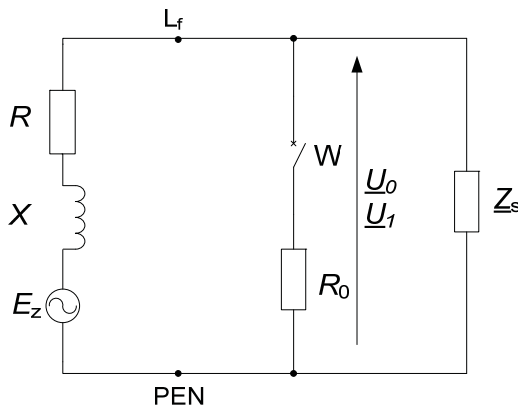
napięć wartość błędu pomiaru impedancji ulega znacznemu zmniejszeniu. Ponadto w niniejszej pracy wykazano, że w przypadku metod z impedancyjnym obciążeniem pomiarowym przy dopasowaniu argumentu impedancji obciążenia pomiarowego do wartości argumentu impedancji pętli wpływ harmonicznych występujących w krzywej napięcia badanego jest w pełni eliminowany.



Rys. 3.4. Błąd  $\delta Z_{odksz} = f(\phi)$  dla danych:  $E_z = 230$  V,  $Z = 1 \Omega$ ,  $T = 0,02$  s,  $R_0 = 2, 10, 100 \Omega$ ,  $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_5 = 0^\circ$ ,  $\alpha_7 = 180^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$

### 3.2.2. Obciążenia robocze sieci

Wpływ na dokładność pomiaru impedancji pętli zwarciowej mają również obciążenia robocze sieci. Sąsiedztwo czynnego odbiornika  $Z_S$  (rys. 3.5) działa bocznikująco w stosunku do mierzonej impedancji pętli zwarciowej  $Z$  [4, 5].



Rys. 3.5. Schemat obwodu badanego w sieci z obciążeniem roboczym  $Z_S$

Impedancja  $Z_S$  została przedstawiona jako impedancja zastępcza złożona z szeregowo połączonej rezystancji  $R_S$  oraz reaktancji indukcyjnej  $X_S$ , o argumentcie  $\phi_S$ . Odbiornik ten wpływa na spadki napięć w sieci, które powodują, że mierzone napięcie przed załączeniem obciążenia pomiarowego różni się od napięcia źródła zasilania.

Przy otwartym łączniku W napięcie  $\underline{U}_0$  wynosi:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{E}_z \cdot \underline{Z}_S}{\underline{Z} + \underline{Z}_S}, \quad (3.10)$$

Natomiast przy zamkniętym łączniku W napięcie  $\underline{U}_1$ :

$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{U}_0 \cdot R_0}{\frac{\underline{Z} \cdot \underline{Z}_S}{\underline{Z} + \underline{Z}_S} + R_0}, \quad (3.11)$$

Stosunek modułów określa wzór:

$$\frac{|\underline{U}_0|}{|\underline{U}_1|} = \left| \frac{\frac{\underline{Z} \cdot \underline{Z}_S}{\underline{Z} + \underline{Z}_S}}{R_0} + 1 \right| = \left| \frac{\underline{U}_0}{\underline{U}_1} \right| = \frac{U_0}{U_1}, \quad (3.12)$$

Zmierzoną impedancję pętli  $Z_{\text{obciąż}}$  przy występujących obciążeniach roboczych określa następująca zależność:

$$Z_{\text{obciąż}} = R_0 \frac{(U_0 - U_1)}{\left( U_1 - \frac{R_0}{Z_S} (U_0 - U_1) \right)}, \quad (3.13)$$

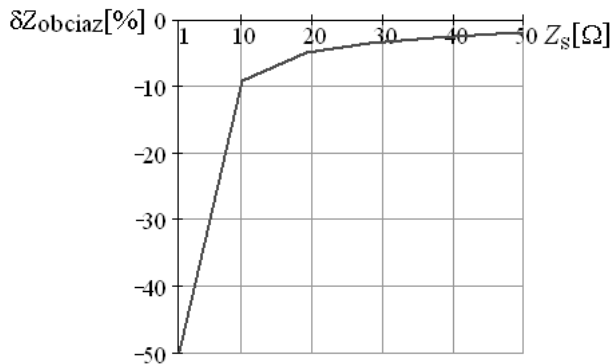
Błąd  $\delta Z_{\text{obciąż}}$  wynikający z sąsiedztwa czynnego odbiornika opisuje wzór:

$$\delta Z_{\text{obciąż}} = \frac{Z_{\text{obciąż}} - Z}{Z} \cdot 100\%, \quad (3.14)$$

Błąd pomiaru impedancji pętli  $\delta Z_{\text{obciąż}}$  spowodowany włączonym do sieci odbiornikiem ma zawsze znak ujemny, a jego wartość zależy od miejsca przyłączenia odbiornika oraz od wartości impedancji obciążenia roboczego  $Z_S$ . Jeśli chodzi o miejsce przyłączenia odbiornika, to największe wartości błędu występują wówczas, gdy pomiary przeprowadzane są na zaciskach odbiorników załączanych w punkcie o największej impedancji, czyli zwykle na końcu sieci.

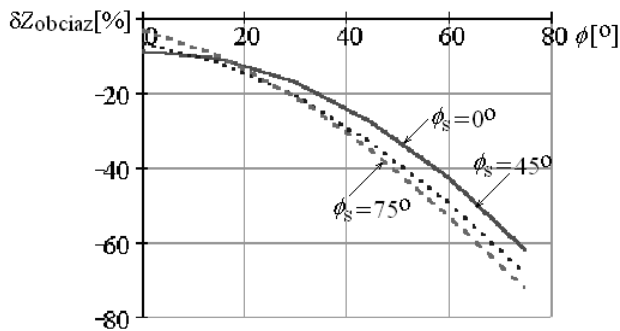
Jeśli chodzi zaś o wartość obciążenia roboczego, największy wpływ mają obciążenia  $Z_S$  o impedancji mniejszej bądź równej impedancji obciążenia pomiarowego, które mogą powodować, że błąd  $\delta Z_{\text{obciąż}}$  może znacznie przekraczać wartość dopuszczalną przez przepisy [78] (rys. 3.6).

Im większa wartość impedancji obciążenia roboczego  $Z_S$ , tym mniejszy błąd  $\delta Z_{\text{obciąż}}$  (wzór (3.13)).



Rys. 3.6. Błąd  $\delta Z_{\text{obciąż}} = f(Z_S)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\phi = \phi_S = 15^\circ$

Na rys. 3.7 przedstawiono wykresy błędu  $\delta Z_{\text{obciąż}} = f(\phi)$ , z których wynika, że błąd  $\delta Z_{\text{obciąż}}$  przyjmuje najmniejszą wartość, gdy  $\phi = 0^\circ$ .



Rys. 3.7. Błąd  $\delta Z_{\text{obciąż}} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $Z_S = 10 \Omega$ ,  $\phi_S = 0, 45, 75^\circ$

Błąd od obciążeń roboczych w sieci można wyeliminować dzięki zastosowaniu odpowiedniej metody i miernika impedancji pętli zwarciowej, przykładem może być miernik [5] wykorzystujący metodę wektorową z eliminacją wpływu obciążeń roboczych sieci opracowany przez S. Czappa [58] z Politechniki Gdańskiej.

### 3.2.3. Odchylenia i wahania napięcia

Zgodnie z [42]: „Odchylenie napięcia  $\Delta E_{\text{odch}}$  to długotrwała różnica między bieżącą, skuteczną wartością napięcia  $E$  a znamionową wartością napięcia  $E_{zn}$  w sieci. Odchylenie napięcia zależy od napięcia w punkcie zasilania sieci oraz spadku napięcia w sieci”:

$$\Delta E_{\text{odch}} = E - E_{zn}, \quad (3.15)$$

Odchylenia napięcia wywołane są spadkami napięć powstającymi w elementach sieci takich jak: transformatory, linie zasilające, dławiki i inne urządzenia elektroenergetyczne.

Normy [42] ze względów technicznych dopuszczają różne, co do wartości i znaku odchylenia, napięcia w zależności od rodzaju odbiornika. W przepisach podane są wartości

dotatnie i ujemne odchylen. Dodatnie – ze względu na możliwość zbyt szybkiego zużywania się urządzeń, natomiast ujemne – ze względu na możliwość zmniejszenia wydajności urządzeń i wzrostu strat energii w sieci.

Odchylenia i wahania napięcia wpływają na dokładność wyznaczenia impedancji pętli, bowiem zwykle określana jest ona na podstawie różnicy napięć  $|E - U|$ , co więcej, niewystępujących jednocześnie. W przypadku, gdy podczas pomiaru różnica  $|E - E_{zn}|$  jest mała, to jest to bez znaczenia wobec dopuszczalnego przez przepisy błędu pomiaru.

Gdy natomiast różnica  $|E - E_{zn}|$  jest duża, otrzymany wynik pomiaru impedancji pętli należy pomnożyć przez współczynnik korygujący, zgodnie z zależnością [56]:

$$S = \frac{S_p}{\left[ 1 - \frac{\Delta E_{\text{odch}}}{E_{zn}} (S_p + 1) \right]}, \quad (3.16)$$

gdzie:  $S$  – to stosunek impedancji pętli  $Z$  do rezystancji obciążenia pomiarowego,

$S_p$  – stosunek impedancji pętli zwarcia wskazanej przez przyrząd  $Z_m$  do obciążenia pomiarowego  $R_0$ .

W praktyce  $S_p = (Z_m/R_0) \ll 1$  i  $(\Delta E_{\text{odch}}/E_{zn}) \ll 1$ , wówczas wzór (3.16) zostaje przekształcony do następującej postaci:

$$S = \frac{S_p}{\left[ 1 - \frac{\Delta E_{\text{odch}}}{E_{zn}} (S_p + 1) \right]} = \frac{S_p}{1 - \frac{\Delta E_{\text{odch}}}{E_{zn}}} = \frac{S_p}{\frac{E_{zn} - \Delta E_{\text{odch}}}{E_{zn}}} = \frac{S_p}{\frac{E}{E_{zn}}}, \quad (3.17)$$

Natomiast impedancję pętli zwarciowej określa zależność:

$$Z = Z_m \frac{E_{zn}}{E}, \quad (3.18)$$

z której wynika, że jeżeli przyrząd pomiarowy nie ma przetwornika ilorazowego, to należy dokonać korekcji, mnożąc odczytany wynik pomiaru  $Z_m$  przez iloraz  $E_{zn}/E$ .

Zgodnie z [42], „Wahanie napięcia – to seria zmian wartości skutecznej napięcia zachodzących z prędkością nie mniejszą niż 2% napięcia znamionowego na sekundę w odstępach czasu nie dłuższych niż 10 minut, o amplitudzie, w stosunku do wartości poprzedzającej, nie większej niż 10%”.

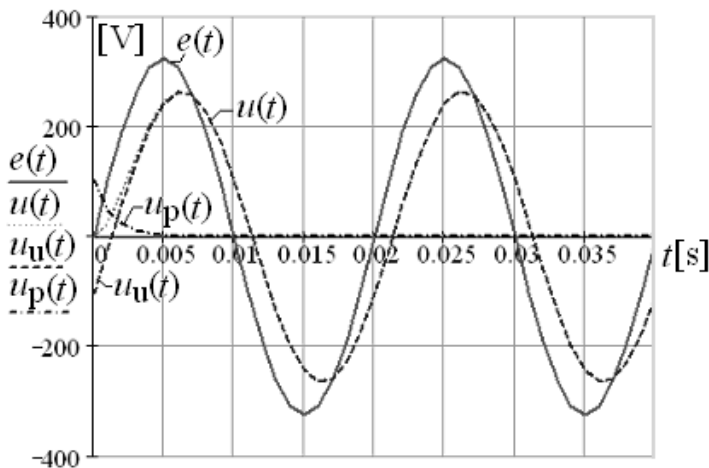
Wahania napięcia mogą być wywołane gwałtownymi zmianami obciążenia (praca tak zwanych odbiorników „niespokojnych”: spawarek, sprężarek tłokowych czy też rozruch silnika klatkowego, który pobiera wówczas prąd kilkakrotnie większy od znamionowego) lub zjawiskami zachodzącymi w samej sieci elektroenergetycznej (zakłócenia w pracy sieci, dokonywanie przełączeń sieciowych oraz skokowa zmiana napięcia za pomocą odczepów transformatorów).

Błąd pomiaru impedancji pętli wywołany wahaniami napięcia eliminuje się przez [56]:

- wykonanie serii pomiarów w jednym punkcie pomiarowym,
- stosowanie możliwie dużego prądu pomiarowego, który powinien być mniejszy od prądu zadziałania najbliższego zabezpieczenia,
- implementację takich metod w miernikach, które pozwalają na pomiar obu napięć w jak najkrótszym odstępie czasu, rzędu okresu napięcia sieci.

### 3.2.4. Stany przejściowe

Kolejnym źródłem błędu pomiaru impedancji pętli zwarciowej są stany przejściowe spowodowane włączaniem i wyłączaniem obciążenia pomiarowego. Stan przejściowy w miernikach z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym zależy od stosunku  $X/R$  sieci oraz wartości rezystancji  $R_0$ . Przykładowe przebiegi napięć  $e(t)$  i  $u(t)$  zostały przedstawione na rys. 3.8.



Rys. 3.8. Stan przejściowy w napięciu  $u(t)$  po załączeniu obciążenia pomiarowego dla danych:  
 $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 2 \Omega$ ,  $\phi = 75^\circ$

Napięcie  $u(t)$  zawiera zarówno składową ustaloną  $u_u(t)$ , jak i składową przejściową  $u_p(t)$ . Napięcie po załączeniu obciążenia pomiarowego opisane jest następującą zależnością:

$$u(t) = \sqrt{2} \frac{R_0}{Z} E \sin(\omega t + \alpha - \psi) - \sqrt{2} \frac{R_0}{Z} E \sin(\alpha - \psi) e^{-\frac{R+R_0}{L}t}, \quad (3.19)$$

gdzie:

$$\psi = \arctg \frac{X}{R + R_0}, \quad (3.20)$$

Czas trwania stanów przejściowych w badanym napięciu dla danych rzeczywistych nie przekracza jednego okresu.

Wpływ stanu przejściowego na dokładność pomiaru impedancji pętli występuje głównie w miernikach wielkoprądowych z półokresowym prądem pomiarowym, na przykład MOZ.

W celu eliminacji błędu pomiaru impedancji pętli zwarcia wywołanego stanami przejściowymi stosuje się opóźnienia w pomiarze napięcia po załączeniu obciążenia pomiarowego oraz tak projektuje się mierniki impedancji pętli, aby prąd pomiarowy płynął w czasie dłuższym niż jeden okres (na przykład miernik MR produkcji SAPEL) [51].

### 3.2.5. Wpływ wartości prądu pomiarowego

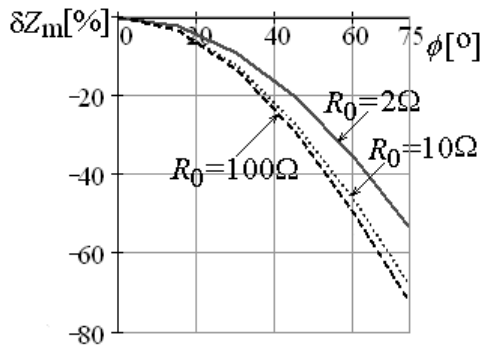
Obecnie w miernikach impedancji pętli zwarciowej stosuje się prąd pomiarowy o wartości od 10mA do 1kA [23, 51, 64].

Stosowanie dużego prądu pomiarowego jest korzystne, bowiem warunki pomiaru są zbliżone do zwarć rzeczywistych, ponadto zwiększa się czułość i dokładności pomiaru.

Zaletą dużego prądu pomiarowego jest również możliwość wykrycia luźnych połączeń stykowych. Natomiast wadą jest to, że duża wartość prądu pomiarowego może spowodować zbędne zadziaływanie zabezpieczeń.

Zaletą małej wartości prądu pomiarowego jest możliwość wykrycia skorodowanych połączeń, których mała rezystancja zmienia się pod wpływem prądu.

Mniejszy błąd pomiaru impedancji pętli występuje dla większej wartości prądu pomiarowego ( $R_0 = 2 \Omega$ , rys. 3.9).



Rys. 3.9. Błąd  $\delta Z_m = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 2, 10, 100 \Omega$

Błąd pomiaru przyjmuje wartość równą zero w przypadku równości argumentów ( $\phi = \phi_0$ ), czyli w przypadku stosowania rezystancyjnego obciążenia pomiarowego, gdy  $\phi = 0^\circ$ , niezależnie od wartości prądu pomiarowego. Należy jednak podkreślić, iż przypadek równości argumentów, czyli ( $\phi = \phi_0$ ) jest przypadkiem teoretycznym, albowiem w praktyce zawsze  $\phi > 0$ .

Oprócz wartości prądu pomiarowego istotne znaczenie ma również czas przepływu tego prądu. W trakcie konstruowania miernika należy zadbać o to, aby prąd pomiarowy przepływał w czasie będącym całkowitą wielokrotnością okresu napięcia (prąd półkresowy jest powodem powstania składowej stałej i wzmocnienia stanu przejściowego), jednocześnie czas przepływu prądu nie powinien przekraczać kilku okresów (eliminacja wpływu wahań napięcia, mniejsza masa i gabaryty przyrządu).

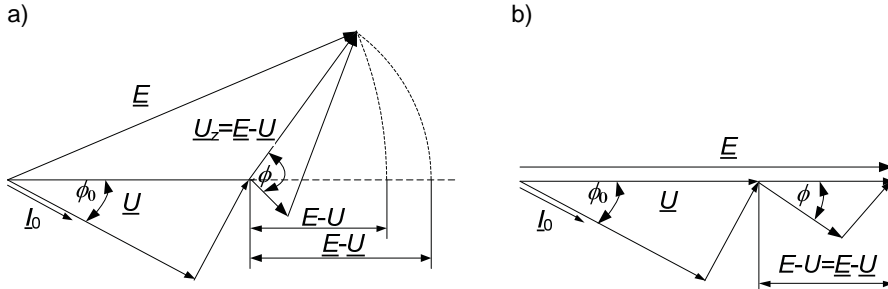
### 3.2.6. Błąd fazowy

Błąd fazowy  $\delta Z_\phi$  spowodowany jest nieuwzględnieniem różnicy faz pomiędzy napięciami  $\underline{E}$  i  $\underline{U}$  (rys. 3.10). Błąd ten charakteryzuje następująca zależność [56]:

$$\delta Z_\phi = \frac{\sqrt{1 + S^2 + 2S \cos \phi} - 1}{S} - 1, \quad (3.21)$$

gdzie:  $S$  – stosunek impedancji pętli zwarcia  $Z$  do obciążenia pomiarowego  $R_0$ .

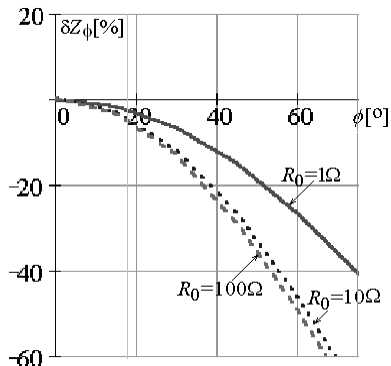
Na rys. 3.10 przedstawiono wpływ różnicy kątów fazowych ( $\phi - \phi_0$ ) na dokładność pomiaru impedancji pętli w przypadku, gdy obciążenie pomiarowe ma charakter czysto rezystancyjny, czyli  $\phi_0 = 0$ , a w rezultacie wpływu kąta fazowego  $\phi$  na dokładność pomiaru impedancji pętli.



Rys. 3.10. Błąd  $\delta Z_\phi$  spowodowany nieuwzględnieniem różnicy faz napięć  $E$  i  $U$ : a)  $\phi \neq \phi_0$ , b) przypadek idealny  $\phi = \phi_0$  [3, 56]

Z powyższego rysunku wynika, że algebraiczną różnicę napięć ( $E - U$ ) można traktować jako wektorową ( $\underline{E} - \underline{U}$ ) jedynie wtedy, gdy kąt fazowy impedancji pętli zwarcia  $\phi$  będzie równy kątowi fazowemu obciążenia pomiarowego  $\phi_0$ , czyli  $\phi = \phi_0$ . W przypadku stosowania rezystancyjnego obciążenia pomiarowego  $\phi_0 = 0^\circ$ , czyli dla  $\phi \neq \phi_0$ , występuje błąd fazowy  $\delta Z_\phi$ , który może wynosić nawet 60% (rys. 3.11), podczas gdy przepisy [8, 78] dopuszczają maksymalnie 30% błąd roboczy pomiaru impedancji pętli.

Błąd fazowy eliminowany jest w klasycznych miernikach impedancji pętli wykorzystujących impedancyjne obciążenie pomiarowe z regulowanym argumentem [51].



Rys. 3.11. Błąd  $\delta Z_\phi = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 1, 10, 100 \Omega$

### 3.3. Metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej

W literaturze [21, 25] spotyka się podział metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej ze względu na:

- rodzaj prądu pomiarowego (przebiegnoprowdowe i stałoprowdowe),
- wartość prądu pomiarowego (małoprowdowe  $I < 1$  A, średnioprowdowe  $1$  A  $\leq I \leq 20$  A, wielkoprowdowe  $I > 50$  A),



- rodzaj obciążenia pomiarowego (rezystancyjne: rezystancja  $R_0$ , impedancyjne: rezystancja  $R_0$  i reaktancja  $X_0$  bądź impedancja  $Z_0$  o regulowanym argumentcie  $\phi_0$ ),
- rodzaj układu pomiarowego (metody techniczne, różnicowe, kompensacyjne, porównawcze, mostkowe).

Nad rozwojem metod i przyrządów do pomiarów impedancji pętli zwarciowej pracowali: Danser i Virfuss ze Szwajcarii [6, 7], Havelka z Czech [15], Streuber z Niemiec [66], Tagg z Anglii [71], Ter-Oganesjan z ZSRR [76].

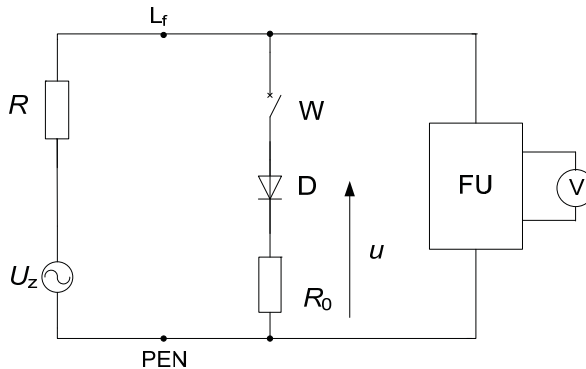
Badania w zakresie pomiarów impedancji pętli zwarciowej w Polsce były i są prowadzone głównie w dwóch ośrodkach: na Politechnice Gdańskiej (Bielański [1], Czap [4, 5], Iwicki [16–18], Musiał [27–31], Piasecki [45], Roskosz [4, 12–14, 17–18, 47–59, 61–62], Sawicki [17, 60–61], Swędrowski [47, 59, 62], Ziółko [80]), oraz na Politechnice Wrocławskiej (Cegielski [3], Masny [23–25], Nawrocki [9–10, 32–40], Stafiniak [35, 38, 40, 63–65], Teresiak [23, 73–75]).

Ze względu na fakt, że będące tematem niniejszej książki metody: z przesunięciem  $\psi$  i metoda wektorowa wykorzystują rezystancyjne obciążenia pomiarowe, w dalszej części tego rozdziału przedstawiono wybrane metody pomiarowe głównie z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym. Opisanymi metodami są: metoda stałoprądowa, techniczna, różnicowa i wektorowa.

### 3.3.1. Metoda stałoprądowa

W literaturze [25] spotkać można także mierniki impedancji pętli (Nulomet, MZS-10) oparte na metodzie stałoprądowej. Metoda stałoprądowa opiera się na założeniu, że reaktancja  $X$  pętli zwarcia jest mała w stosunku do rezystancji  $R$  (rys. 3.12), dlatego też pomiar taki z wystarczającą dokładnością może być stosowany przy ocenie skuteczności ochrony przeciwporażeniowej jedynie odbiorników o najmniejszych mocach, położonych daleko od źródła.

Do zacisków zasilania L-PEN układu pomiarowego przyłączono człon obciążenia pomiarowego, złożony z rezystancji  $R_0$  i diody D. Po zamknięciu łącznika W, w pętli zwarciowej przepływa wyprostowany półfalowo prąd pomiarowy, wywołujący spadek napięcia na rezystancji pętli  $R$  w półokresach przewodzenia diody D, w wyniku czego w napięciu na zaciskach układu pomiarowego występuje składowa stała napięcia.



Rys. 3.12. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej faza-zero metodą stałoprądową [25],  
FU – filtr dolnoprzepustowy

Podziałkę woltomierza V wycechowano zgodnie z zależnością:

$$R = R_0 \left( \frac{U_{zm}}{\pi U_{st}} - 1 \right)^{-1}, \quad (3.22)$$

gdzie:  $U_{zm}$  – amplituda napięcia źródłowego sieci,  
 $U_{st}$  – składowa stała.

Przykładem takiego miernika jest Nulomet (firma „Metra” w CSRS).

Cechą charakterystyczną metody stałoprądowej jest możliwość występowania dużych błędów pomiaru (rzędu nawet kilkunastu procent) spowodowanych odchyleniami napięcia, czy też wpływem odbiorników roboczych (zwłaszcza jednofazowych o charakterze indukcyjnym).

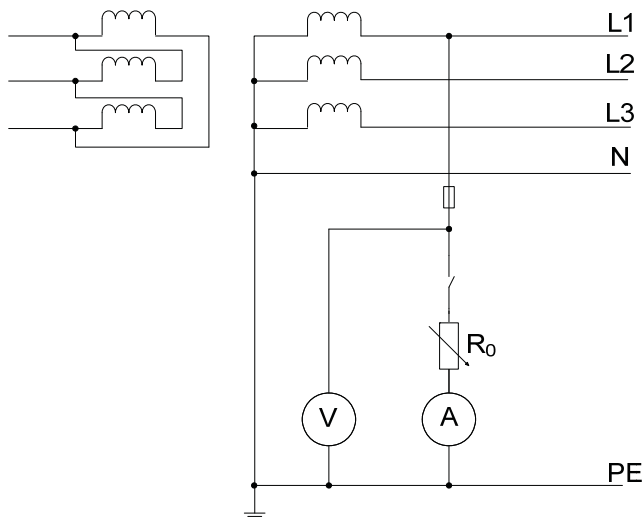
Błąd spowodowany odchyleniami napięcia można ograniczyć, wprowadzając odpowiednie współczynniki korekcyjne do wyników pomiarów, natomiast błąd spowodowany bocznikującym wpływem odbiorników można całkowicie wyeliminować przez:

- wyznaczenie rezystancji pętli  $R$  jako wartości średniej z dwóch pomiarów (przy zamienionych miejscami przewodach badanej pętli przyłączonych do zacisków przyrządu),
- wprowadzanie do układu pomiarowego członu kompensującego składową stałą. W człon taki wyposażono przyrząd MZS-10 (Instytut Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej) [25]. Człon ten wyeliminował również wpływ wahań i odchyłeń napięcia sieciowego oraz odkształceń napięcia sieciowego na wynik pomiaru.

### 3.3.2. Metoda techniczna z zastosowaniem własnego źródła zasilania

Metoda ta opiera się na zasadzie sztucznego zwarcia. Za pomocą obciążenia pomiarowego ogranicza się prąd pomiarowy do wartości bezpiecznej. Stosowanymi elementami ograniczającym prąd zwarcia są: rezystancja  $R_0$ , impedancja  $Z_0$  bądź rezystancja  $R_0$  i reaktancja  $X_0$ .

W sprawdzanym obwodzie (rys. 3.13) mierzone jest napięcie  $E$  przed załączeniem obciążenia pomiarowego  $R_0$  oraz napięcie  $U$  i prąd  $I$  po załączeniu obciążenia pomiarowego.



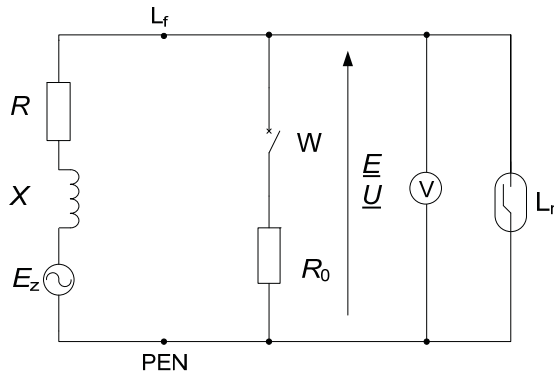
Rys. 3.13. Schemat układu pomiarowego do pomiaru impedancji pętli zwarcia metodą techniczną z zastosowaniem własnego źródła zasilania na podstawie [41]

Impedancja pętli zwarciowej wyznaczana jest z następującej zależności:

$$Z = \frac{E - U}{I} \quad (3.23)$$

Mierniki realizujące pomiar metodą techniczną wykorzystuje się do pomiaru impedancji o wartościach większych niż  $1 \Omega$  z błędem na poziomie kilkunastu procent [37]. Wzrost dokładności uzyskuje się, zwiększając prąd zwarciowy i poszerzając podziałkę woltomierza przy końcu podzielnicy [25].

Przykładem miernika impedancji pętli wykorzystującego metodę prądu przemiennoprądowego jest miernik MZU-1 opracowany przez Z. Teresiaka [25, 73] (rys. 3.14). Charakterystyczną cechą tego miernika jest woltomierz o nieliniowej podziałce (rozszerzonej w końcowej części zakresu pomiarowego).



Rys. 3.14. Schemat miernika MZU-1 do pomiaru impedancji pętli zwarcia metodą prądu przemiennoprądowego [70]

Sztuczne zwarcie w tym przyrządzie wykonuje się przez załączenie rezystancyjnego obciążenia pomiarowego  $R_0$ . Po załączeniu  $R_0$  wskazówka woltomierza (wywzorcowanego w omach) odchyła się na skutek spadku napięcia wywołanego przepływem prądu pomiarowego, proporcjonalnie do wartości impedancji pętli zwarcia  $Z$ .

Lampka neonowa  $L_n$  służy jako wskaźnik napięcia sygnalizujący ciągłość przewodów ochronnych.

Miernik MZU-1 wykazuje znaczne błędy systematyczne wynikające z rezystancyjnego charakteru obciążenia pomiarowego oraz wartości prądu pomiarowego.

### 3.3.3. Metoda różnicowa

Układ do pomiaru impedancji pętli metodą różnicową opracowany K. Bielańskiego [2] został przedstawiony na rysunku 3.15.

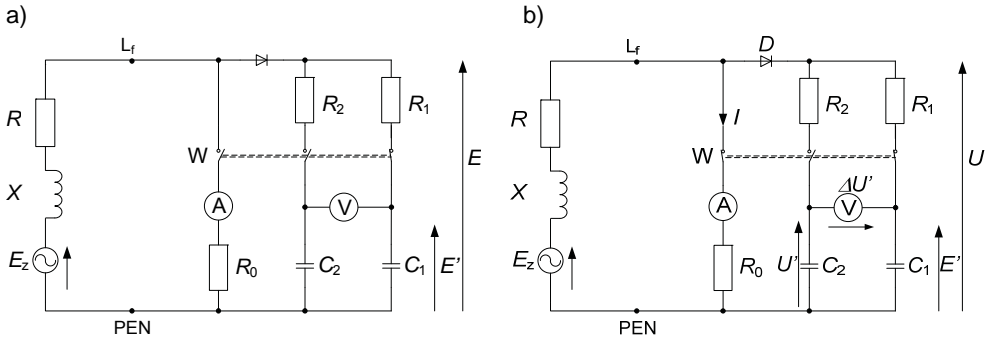
Pomiar odbywa się w dwóch cyklach pomiarowych. W pierwszym cyklu (rys. 3.15a) ładowany jest kondensator  $C_1$  prądem zależnym od napięcia  $E$ , natomiast w drugim cyklu pomiarowym (rys. 3.15b) kondensator  $C_2$  ładowany jest prądem zależnym od napięcia sztucznego zwarcia  $U$  oraz mierzony jest prąd  $I$ . Napięcia  $E'$  i  $U'$  występujące na kondensatorach  $C_1$  i  $C_2$  są odpowiednio proporcjonalne do napięć  $E$  i  $U$ . Woltomierz wskazuje różni-

ce napięć  $\Delta U = E - U$ . Natomiast impedancja pętli obwodu zwarciowego wyznaczana jest z następującej zależności:

$$Z = \frac{\Delta U}{I} = \frac{E - U}{I} \quad (3.24)$$

Dokładność pomiaru impedancji pętli miernikiem działającym zgodnie z metodą różnicową jest znacznie większa niż miernikiem realizującym metodę techniczną.

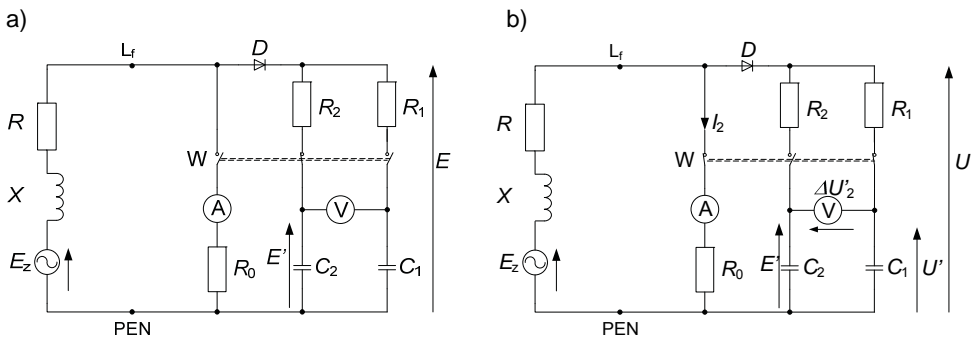
W literaturze spotykane są dwie odmiany metody różnicowej, z przestawieniem oraz podstawieniem [37, 64, 65].



Rys. 3.15. Pomiar impedancji obwodu zwarciowego metodą różnicową [37]:

- a) przetwarzanie napięcia źródła  $E_z$  na napięcie  $E'$ , b) przetwarzanie napięcia sztucznego zwarcia  $U$  na napięcie  $U'$  i pomiar napięcia  $\Delta U$  i prądu sztucznego zwarcia  $I$

W metodzie z przestawieniem można wyróżnić dwa etapy pomiarowe. Etap pierwszy przeprowadzany jest tak jak cykl pierwszy i drugi w metodzie różnicowej (rys. 3.15). Wynikiem etapu pierwszego jest zmierzone napięcie  $\Delta U_1 = E - U$  oraz prąd sztucznego zwarcia  $I_1$ . Natomiast w drugim etapie zostają przestawione miejsca obwodu do pomiaru napięć  $E$  i  $U$  tak, jak zostało to pokazane na rys. 3.16.



Rys. 3.16. Drugi cykl pomiaru impedancji pętli zwarciowej metodą różnicową z przestawieniem [37]:

- a) przetwarzanie napięcia źródłowego  $E_z$  na napięcie  $E'$ , b) przetwarzanie napięcia sztucznego zwarcia  $U$  na napięcie  $U'$  i pomiar napięcia  $\Delta U_2$  i prądu  $I_2$

Impedancję pętli wyznacza się jako wartość średnią z dwóch etapów pomiarowych [37]:

$$Z = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta U_1}{I_1} + \frac{\Delta U_2}{I_2} \right) \quad (3.25)$$

Przy założeniu, że rezystancja obciążenia pomiarowego  $R_0$  i napięcie sieci  $E_z$  przyjmują takie same wartości w obydwu cyklach pomiarowych oraz że impedancja obwodu zwarciowego jest stała, można przyjąć, że  $I_1 = I_2 = I$ . Wówczas zależność (3.25) przyjmie następującą postać:

$$Z = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta U_1 + \Delta U_2}{I} \right) \quad (3.26)$$

**Metoda różnicowa z podstawieniem** [64] różni się tym od pozostałych metod różnicowych, że w układzie miernika występuje dodatkowe źródło napięcia zwane pomocniczym napięciem odniesienia  $U_p$ . W metodzie tej można wyróżnić również dwa cykle pomiarowe. W pierwszym cyklu porównuje się napięcie  $E$  z pomocniczym napięciem odniesienia  $U_p$ . Wynikiem tego porównania jest wyznaczana różnica tych napięć jako  $\Delta U_1 = E - U_p$ . Natomiast w cyklu drugim porównuje się napięcie sztucznego zwarcia  $U$  z pomocniczym napięciem  $U_p$  oraz mierzony jest prąd sztucznego zwarcia  $I$ . Impedancję pętli w tej metodzie wyznacza się, jako:

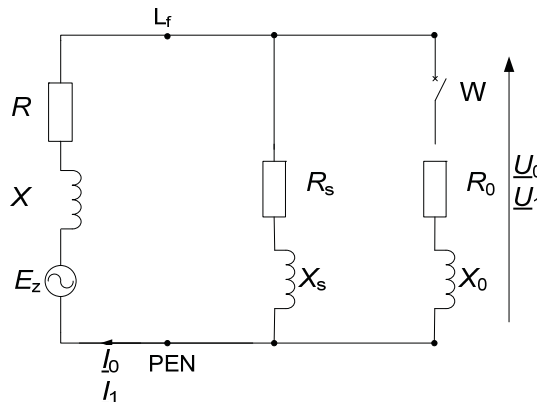
$$Z = \frac{\Delta U_1 - \Delta U_2}{I}, \quad (3.27)$$

przy czym  $\Delta U_2 = U - U_p$  otrzymuje się, gdy płynie prąd.

### 3.3.4. Metoda wektorowa z eliminacją wpływu obciążeń roboczych sieci

Kolejną metodą pomiaru impedancji pętli jest odmiana metody wektorowej (opisana w rozdziale 4.2), czyli metoda wektorowa eliminująca wpływ obciążeń roboczych na wynik pomiaru [58].

Wyznaczenie impedancji pętli tą metodą opiera się na pomiarze chwilowych wartości prądu i napięcia w układzie przedstawionym na rys. 3.17.



Rys. 3.17. Schemat układu pomiarowego do pomiaru impedancji pętli zwarcia metodą wektorową z eliminacją wpływu obciążeń roboczych sieci [5]

Rolę obciążenia roboczego sieci pełni impedancja  $Z_S$ , złożona z szeregowo połączonego rezystora  $R_S$  i indukcyjności  $X_S$ , o argumentcie  $\phi_S$ .

Idea tej metody pomiarowej polega na wyznaczeniu składowych ortogonalnych dwóch fazorów prądu i dwóch fazorów napięcia odpowiednio  $\underline{I}_0$  i  $\underline{U}_0$  przed oraz  $\underline{I}_1$  i  $\underline{U}_1$  po załączeniu obciążenia pomiarowego  $R_0$ .

Składowe ortogonalne fazorów prądów  $\underline{I}_0$  i  $\underline{I}_1$  są określone na podstawie próbek prądu  $I_{0b}$  i  $I_{0c}$  oraz  $I_{1b}$  i  $I_{1c}$  pobranych w odpowiednich chwilach czasowych. Analogiczną procedurę stosuje się w celu wyznaczenia fazorów napięcia  $\underline{U}_0$  i  $\underline{U}_1$ . Algorytm pomiarowy jest następujący: najpierw przy odłączonym obciążeniu pomiarowym  $R_0$  w dowolnie wybranej chwili  $t_1$  dokonywany jest pomiar wartości chwilowych  $I_{0b}$  i  $U_{0b}$ , a w chwili  $t_2 = t_1 + T/4$  wartości  $I_{0c}$  i  $U_{0c}$ . Następnie załączane jest obciążenie pomiarowe  $R_0$  i w czasie  $t_3 = t_1 + kT$  mierzone są  $I_{1b}$  i  $U_{1b}$ , a w chwili  $t_4 = t_1 + T/4 + kT$  wartości  $I_{1c}$  i  $U_{1c}$ . Na podstawie czterech wartości chwilowych prądu  $I_{0b}$ ,  $I_{0c}$ ,  $I_{1b}$ ,  $I_{1c}$  i czterech wartości chwilowych napięcia  $U_{0b}$ ,  $U_{0c}$ ,  $U_{1b}$ ,  $U_{1c}$  wyznaczana jest wartość impedancji pętli  $Z$  z następującej zależności [5]:

$$Z = \sqrt{\frac{(U_{0c} - U_{1c})^2 + (U_{0b} - U_{1b})^2}{(I_{1c} - I_{0c})^2 + (I_{1b} - I_{0b})^2}}, \quad (3.28)$$

Zaletą tej metody pomiarowej jest eliminacja błędów fazowych oraz wpływu obciążeń roboczych sieci na wynik pomiaru impedancji pętli.

### 3.4. Podsumowanie przeglądu metod pomiaru impedancji

Przedstawione w rozdziale trzecim metody pomiaru impedancji pętli zwarcia: stałoprądowa i techniczna charakteryzują się dużymi błędami pomiarowymi. Znacznie dokładniejsze wyniki uzyskuje się, stosując metody różnicowe bądź metodę wektorową, w której impedancja wyznaczana jest na podstawie składowych ortogonalnych fazora napięcia (zgodnie z zależnością (3.5)), dzięki czemu pomiar impedancji jest dokładniejszy.

Znane są podstawy teoretyczne metod pomiaru impedancji pętli zwarcia: metody z przesunięciem  $\psi$  [4, 12, 55] i metody wektorowej [50, 52, 53, 56], opracowane przez R. Roskosza, w których impedancja pętli zwarcia wyznaczana jest w oparciu o składowe ortogonalne fazora napięcia. Zasady pomiaru tych metod pozwalają przypuszczać, że uzyskane tymi metodami wyniki pomiarów będą bliższe rzeczywistości niż zmierzone opisanymi wcześniej metodami. Jednakże, aby móc to jednoznacznie stwierdzić, należy przeprowadzić analizy metrologiczne metody z przesunięciem  $\psi$  i metody wektorowej. Wyniki tych analiz zostały zaprezentowane w kolejnym rozdziale.

## Rozdział 4

# METODY POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI OPARTE NA WYZNACZENIU SKŁADOWYCH ORTOGONALNYCH FAZORA NAPIĘCIA

W rozdziale czwartym przedstawione zostały podstawy teoretyczne metody z przesunięciem  $\psi$  [4, 12, 55] i metody wektorowej [50, 52, 53, 56]. Metody te umożliwiają dokładniejszy pomiar impedancji pętli  $Z$ , w porównaniu z metodami klasycznymi, w oparciu o składowe ortogonalne napięcia.

Zaprezentowano również wyniki analizy metrologicznej dotyczące metody z przesunięciem  $\psi$  i metody wektorowej. Wyniki przeprowadzonych symulacyjnych analiz wrażliwości obu metod pozwolą określić maksymalny błąd graniczny, jakiego w danych warunkach pomiarowych może spodziewać się użytkownik.

W celu przedstawienia podstaw teoretycznych obu metod zakłada się, że:

- badany obwód liniowy składa się z szeregowego połączenia idealnego źródła o sinusoidalnej sile elektromotorycznej  $E$  oraz impedancji wewnętrznej  $Z$  złożonej z szeregowo połączonej: reaktancji indukcyjnej  $X$  oraz rezystancji  $R$  – wynikających z parametrów źródła oraz elementów linii zasilających.
- obciążenie pomiarowe ma charakter rezystancyjny  $R_0$  i jest liniowe,
- w badanym obwodzie nie występują odchylenia i wahania napięcia,
- wprowadza się opóźnienie  $k = T$  ( $T$  – okres napięcia sieci) w stosunku do próbek na podstawie których wyznaczane jest napięcie  $U$  w celu zminimalizowania wpływu stanów przejściowych na wynik pomiaru.

Impedancja pętli zwarciowej mierzona metodą z przesunięciem  $\psi$  obliczana jest na podstawie kąta przesunięcia  $\psi$  między napięciem  $e(t)$  przed i  $u(t)$  po załączeniu obciążenia pomiarowego  $R_0$  [55]. Natomiast w metodzie wektorowej wartość impedancji określa się na podstawie czterech chwilowych wartości napięcia pobranych w odpowiednich chwilach czasowych.

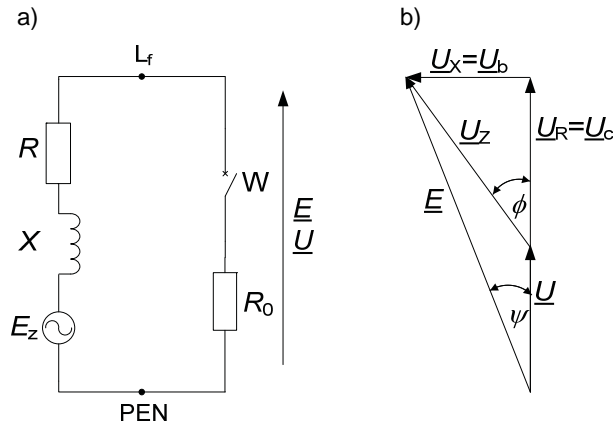
### 4.1. Metoda z przesunięciem $\psi$

Pomiar impedancji pętli zwarciowej  $Z$  oparty na zastosowaniu rezystancyjnego obciążenia pomiarowego  $R_0$  przebiega zgodnie ze schematem na rys. 4.1a [4, 12, 55, 57].

Mierzoną wartością jest impedancja  $Z$  wyrażona zależnością:

$$Z = R + jX, \quad (4.1)$$

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  $\psi$  między fazorami napięć  $\underline{E}$  i  $\underline{U}$ .



Rys. 4.1. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej [13, 55]:

a) schemat zastępczy obwodu badanego, b) wykres fazyrowy napięć w badanym obwodzie

Zgodnie z wykresem fazyrowym przedstawionym na rys. 4.1b obowiązuje zależność określająca napięcie impedancji pętli  $U_Z$  jako:

$$U_Z^2 = U_R^2 + U_X^2, \quad (4.2)$$

Przy czym napięcia  $U_R$  i  $U_X$  opisują odpowiednio zależności:

$$\cos \psi = \frac{U_R + U}{E} \Rightarrow U_R = E \cos \psi - U, \quad (4.3)$$

$$\sin \psi = \frac{U_X}{E} \Rightarrow U_X = E \sin \psi. \quad (4.4)$$

Podstawiając wzory (4.3) i (4.4) do (4.2), otrzymujemy wzór opisujący spadek napięcia  $U_Z$  na impedancji  $Z$  jako:

$$\begin{aligned} U_Z^2 &= (E - U)^2 + 2EU(1 - \cos \psi) = \\ &= (E - U)^2 + 4EU \sin^2 \frac{\psi}{2}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

Impedancję pętli  $Z$  w tym układzie określa zależność:

$$Z = \frac{U_Z}{I} = R_0 \frac{U_Z}{U}. \quad (4.6)$$

Uwzględniając, że  $U_Z$  dane jest wzorem (4.5) ostatecznie impedancję pętli, wyznaczoną metodą z przesunięciem  $\psi$ , opisuje zależność:

$$Z_\psi = R_0 \sqrt{\left(\frac{E}{U} - 1\right)^2 + 4 \frac{E}{U} \sin^2 \frac{\psi}{2}}, \quad (4.7)$$

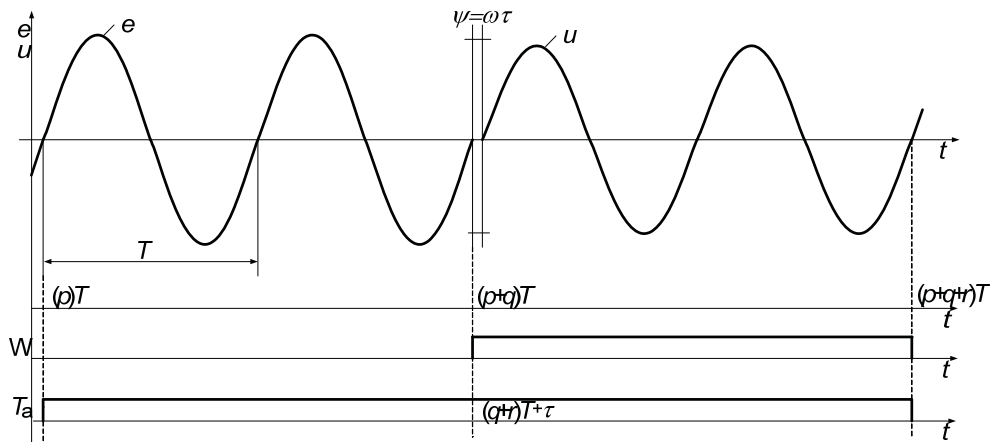


Wiedząc, że  $\psi \rightarrow \tau$  i  $2\pi \rightarrow T$ , otrzymujemy  $\psi/2 = \pi\tau/T$ . Przesunięcie czasowe  $\tau$ , między napięciami przed i po załączeniu obciążenia pomiarowego  $R_0$ , zgodnie z rysunkiem 4.2, można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$\tau = \text{mod} \left( \frac{T_a}{T} \right), \quad (4.8)$$

gdzie:  $T_a$  – interwał czasu między wybranymi przejściami przez zero napięcia  $e(t)$  i  $u(t)$ .

W chwili załączenia wyłącznika W występuje stan przejściowy, który nie został zaznaczony na rys. 4.2 ( $p, q, r$  – są liczbami naturalnymi).



Rys. 4.2. Przebiegi mierzonych napięć i sygnałów sterujących

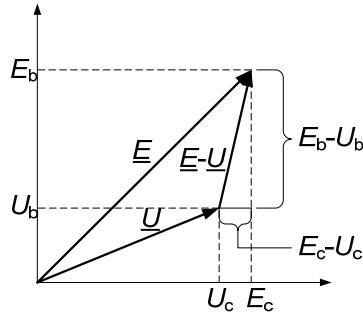
Wówczas zależność (4.7) ma postać [55]:

$$Z_\psi = R_0 \sqrt{\left( \frac{E}{U} - 1 \right)^2 + 4 \frac{E}{U} \sin^2 \left( \pi \frac{\tau}{T} \right)}. \quad (4.9)$$

Zgodnie z zależnością (4.9), w celu wyznaczenia impedancji pętli zwarciowej metodą z przesunięciem  $\psi$ , należy zmierzyć napięcia  $E$  i  $U$  oraz przesunięcie  $\tau$  między tymi napięciami.

## 4.2. Metoda wektorowa

Metoda wektorowa pomiaru impedancji pętli zwarciowej [50, 52, 56] polega (zgodnie z rys. 4.1a) na wyznaczeniu fazorów dwóch napięć, odpowiednio przed  $\underline{E}$  i  $\underline{U}$  po załączeniu rezystancyjnego obciążenia pomiarowego  $R_0$  przez pomiar składowych ortogonalnych tych dwóch napięć (rys. 4.3).



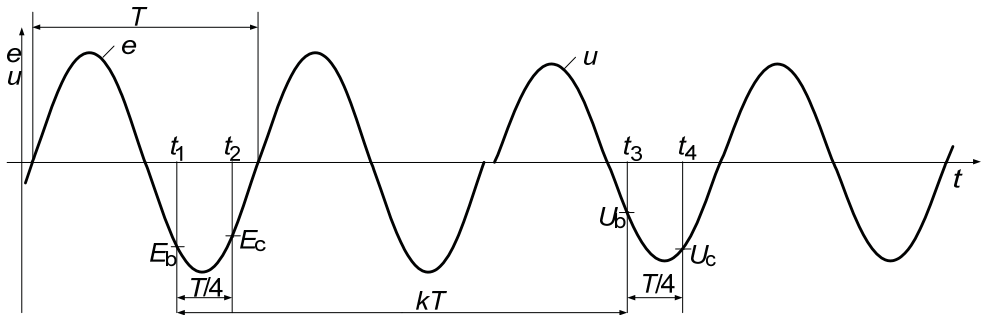
Rys. 4.3. Fazorowy wykres napięć przy pomiarze impedancji pętli zwarciowej [56]

Na podstawie wartości składowych:  $E_b$  i  $E_c$ ,  $U_b$  i  $U_c$  (rys. 4.4) można określić odpowiednio wartości fazy napięć  $\underline{E}$  i  $\underline{U}$ , zgodnie z zależnościami:

$$E_c + jE_b = E \cos \omega t + jE \sin \omega t = \underline{E}, \quad (4.10)$$

$$U_c + jU_b = U \cos \omega t + jU \sin \omega t = \underline{U}, \quad (4.11)$$

W chwili załączenia wyłącznika W występuje stan przejściowy, który nie został zaznaczony na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Krzywa napięcia z oznaczonymi chwilami pomiaru [56]

Fazor napięcia  $\underline{E}$  wyznaczony zostaje na podstawie dwóch chwilowych wartości nieobciążonego źródła napięcia:  $E_b$  i  $E_c$  – przy otwartym łączniku W (rys. 4.4). Pierwsza wartość  $E_b$  pobrana w dowolnej chwili  $t_1$ :

$$E_b = e(t_1) = \sqrt{2}E \sin \omega t_1 \quad (4.12)$$

Natomiast druga próbka napięcia  $E_c$  pobrana w chwili  $t_2$  przesuniętej o  $T/4$  w stosunku do pierwszej  $t_1$ , czyli  $t_2 = t_1 + T/4$ :

$$E_c = e(t_2) = \sqrt{2}E \cos \omega t_1 \quad (4.13)$$

Tę samą procedurę stosuje się przy określeniu fazy napięcia  $\underline{U}$ , który zostaje wyznaczony na podstawie dwóch chwilowych wartości napięcia:  $U_b$  i  $U_c$  – przy zamkniętym łączniku W, przy czym wartości te przesunięte są w stosunku do  $E_b$  i  $E_c$  o opóźnienie  $k$  okresów, czyli

$t_3 = t_1 + kT$ . Opóźnienie to zostaje wprowadzone w celu zminimalizowania wpływu stanów przejściowych wywołanych komutacją łącznika W na błąd pomiaru.

Wartość napięcia  $U_b$  pobraną w chwili  $t_3$  określa zależność:

$$U_b = u(t_3) = \sqrt{2} \frac{ER_0}{\sqrt{(R + R_0)^2 + X^2}} \sin \omega(t_1 + \psi), \quad (4.14)$$

Natomiast wartość napięcia  $U_c$ , wyznaczoną w chwili  $t_4 = t_1 + T/4 + kT$  (analogicznie do wartości napięcia  $E_c$ ), opisuje wzór:

$$U_c = u(t_4) = \sqrt{2} \frac{ER_0}{\sqrt{(R + R_0)^2 + X^2}} \cos \omega(t_1 + \psi), \quad (4.15)$$

Na podstawie równań opisujących stan napięciowy obwodu badanego (rys. 4.1a) oraz przy znajomości zależności określających wartości chwilowe napięcia  $E_b$  i  $E_c$ ,  $U_b$  i  $U_c$  można wyznaczyć rezystancję  $R_w$  i reaktancję  $X_w$  pętli zwarciowej wyznaczonej metodą wektorową jako [56]:

$$R_w = R_0 \frac{(E_c - U_c) \cdot U_c + (E_b - U_b) \cdot U_b}{U_c^2 + U_b^2}, \quad (4.16)$$

$$X_w = R_0 \frac{E_b U_c - E_c U_b}{U_c^2 + U_b^2}, \quad (4.17)$$

oraz moduł impedancji pętli zwarciowej:

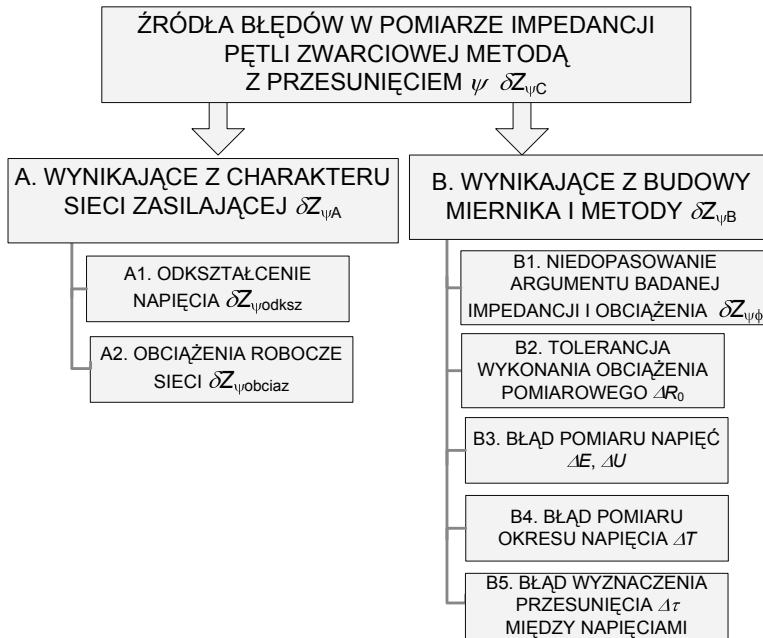
$$Z_w = R_0 \sqrt{\frac{(E_c - U_c)^2 + (E_b - U_b)^2}{U_c^2 + U_b^2}}, \quad (4.18)$$

### 4.3. Analiza metrologiczna metody z przesunięciem $\psi$

Celem, przeprowadzonej przez autorkę, analizy metrologicznej metody z przesunięciem  $\psi$ , pomiaru impedancji pętli zwarciowej jest sprawdzenie, które z parametrów obwodu badanego i miernika decydująco wpływają na dokładność pomiaru.

Dlatego też przeprowadzono jednokierunkową analizę wrażliwości pozwalającą na ocenę kolejno i indywidualnie wpływu każdej wielkości wejściowej na dokładność pomiaru impedancji pętli zwarciowej. Wyniki tych analiz pozwolą sprecyzować, jakiego maksymalnie błędu pomiarowego może spodziewać się użytkownik, mierząc impedancję pętli w określonych warunkach metodą z przesunięciem  $\psi$ .

Na rysunku 4.5 przedstawiono źródła błędów występujące podczas pomiaru impedancji pętli zwarciowej metodą z przesunięciem  $\psi$ . W dalszej części tego rozdziału zostały one poddane dalszej analizie, w której założono, że odchylenia i wahania napięcia oraz stany przejściowe nie wpływają na dokładność pomiaru.



Rys. 4.5. Uwzględnione w analizie źródła błędów w pomiarze impedancji pętli zwarciowej metodą z przesunięciem  $\psi$

W celu określenia całkowitego błędu  $\delta Z_{\psi C}$  pomiaru impedancji każdą z metod przyjęto, że źródła błędów – wynikające z charakteru sieci zasilającej  $\delta Z_{\psi A}$  oraz budowy miernika i przyjętej metody pomiaru  $\delta Z_{\psi B}$  nie są ze sobą skorelowane, wobec czego całkowity błąd wyznaczenia impedancji  $\delta Z_{\psi C}$  opisuje zależność:

$$\delta Z_{\psi C} = |\delta Z_{\psi A}| + |\delta Z_{\psi B}|, \quad (4.19)$$

gdzie na błąd  $\delta Z_A$  składają się czynniki A1 do A2 wymienione na rys. 4.5. W tym wypadku przyjęto również, że każdy z czynników od A1 do A2 nie jest skorelowany i wówczas:

$$\delta Z_{\psi A} = |\delta Z_{\psi odks}| + |\delta Z_{\psi obci}|, \quad (4.20)$$

gdzie: błędy  $\delta Z_{\psi odks}$ ,  $\delta Z_{\psi obci}$  wyznaczone są z następujących zależności:

$$\delta Z_{\psi obci} = \frac{Z_{\psi obci} - Z}{Z} \cdot 100\% \quad \delta Z_{\psi odks} = \frac{Z_{\psi odks} - Z}{Z} \cdot 100\%, \quad (4.21)$$

Natomiast błąd  $\delta Z_{\psi B}$  wynikający z budowy miernika i metody pomiaru wyznaczono na podstawie funkcji pomiaru.

Prezentowane w dalszej części tego rozdziału wyniki analiz metrologicznych obu metod uzyskano dzięki symulacjom komputerowym przeprowadzonym w programie MathCad. Podczas analiz założono, że występuje tylko jedno źródło błęd pomiaru impedancji pętli zwarciowej – to aktualnie analizowane, a inne błędy w tym czasie nie występują.

### 4.3.1. Źródła błędów wynikające z charakteru sieci i obwodu badanego

W celu określenia wrażliwości metody na różne czynniki wynikające z charakteru obwodu badanego skorzystano ze wzorów (4.21).

#### 4.3.1.1. Odształcenie krzywej napięcia i parametry obwodu badanego

Impedancja pętli zwarciowej odnosi się zazwyczaj do układów o sinusoidalnym kształcie napięcia. Jednakże w praktyce krzywa napięcia w miejscu badania jest odształcona i może być źródłem dodatkowego błędu pomiaru.

Dla przeprowadzenia analizy wpływu odształcenia napięcia na dokładność pomiaru impedancji w oparciu o zależność (4.9) przyjmuje się, że napięcia  $E$  i  $U$  występujące w miejscu pomiaru zawierają trzecią, piątą, siódmą, dziewiątą, jedenastą i trzynastą harmoniczną ( $E_3, E_5, E_7, E_9, E_{11}, E_{13}$  i  $U_3, U_5, U_7, U_9, U_{11}, U_{13}$ ), o różnych wartościach współczynnika udziału  $a_n$ .

Współczynnik udziału zdefiniowano jako:

$$a_n = \frac{E_n}{E_1}, \quad (4.22)$$

oraz różnych kątach fazowych początkowych ( $\alpha_3, \alpha_5, \alpha_7, \alpha_9, \alpha_{11}, \alpha_{13}$ ), nałożone na sinusoidalny przebieg podstawowy ( $E_1$  i  $U_1$ ) o początkowym kącie fazowym  $\alpha_1$ . Założenie takie przyjęto głównie ze względu na powszechność stosowania 6 i 12-pulsowych przekształtników, pobierających prąd o znaczącym udziale ( $I_n/I_1$  powyżej 0,1) tych harmonicznym [26].

Wyznaczenie impedancji pętli zwarciowej przy odształconym napięciu metodą z przesunięciem  $\psi$  polega na obliczeniu wartości skutecznych napięć  $E_{sk}$  i  $U_{sk}$ , wyznaczonych odpowiednio z zależności:

$$E_{sk} = \sqrt{\sum_n E_n^2} \quad U_{sk} = \sqrt{\sum_n U_n^2} = \sqrt{\sum_n \left( \frac{a_n E_1 R_0}{\sqrt{(R + R_0)^2 + (nX)^2}} \right)^2}, \quad (4.23)$$

gdzie:  $n = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13$ .

Uwzględniając wzory (4.23) w (4.9) otrzymano na impedancję pętli zwarciowej  $Z$  następującą zależność:

$$Z = R_0 \sqrt{\left( \frac{E_{sk}}{U_{sk}} - 1 \right)^2 + 4 \frac{E_{sk}}{U_{sk}} \sin^2 \pi \frac{\tau}{T}}, \quad (4.24)$$

Zgodnie ze wzorem (4.24), w celu wyznaczenia impedancji pętli zwarciowej, należy zmierzyć napięcia  $E_{sk}$  i  $U_{sk}$  oraz czas przesunięcia  $\tau$  między przebiegami napięcia.

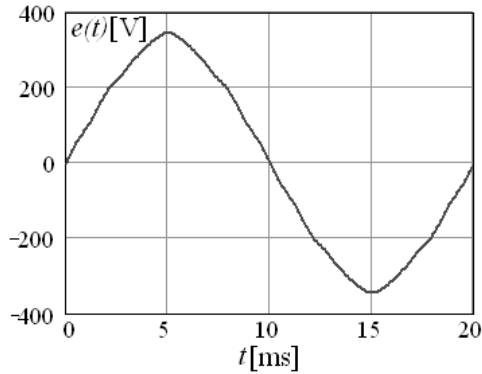
Przyjęto, że w mierzonej krzywej napięcia jednocześnie występują harmoniczne: trzecia, piąta, siódma, dziewiąta, jedenasta i trzynasta, przypisując im następujące współczynniki udziału:

$$a_3 = 0,03 \quad a_5 = 0,02 \quad a_7 = 0,01 \quad a_9 = 0,0025 \quad a_{11} = 0,0075 \quad a_{13} = 0,01 \quad (4.25)$$

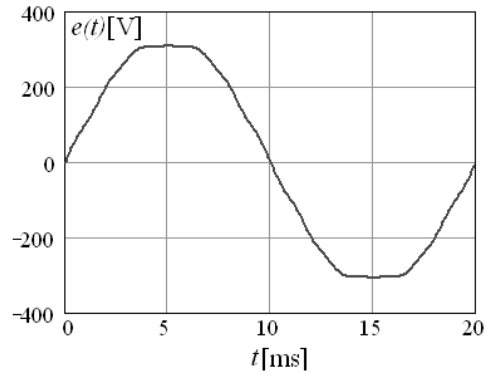
Udział poszczególnych harmonicznym przyjęto zgodnie z tab. 3.1 oraz tak, aby współczynnik  $THD$  nie przekraczał 8% [42].

Analizy zostały wykonane dla trzech typów krzywych [56]:

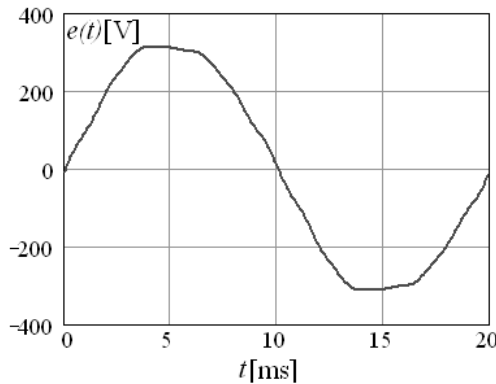
- krzywej wyostrzonej  $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_5 = 0^\circ$ ,  $\alpha_7 = 180^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$  (rys. 4.6),
- krzywej spłaszczonej  $\alpha_3 = 0^\circ$ ,  $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 180^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$  (rys. 4.7),
- krzywej siodłowej  $\alpha_3 = -45^\circ$ ,  $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 0^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$  (rys. 4.8).



Rys. 4.6. Krzywa napięcia wyostrzona  $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_5 = 0^\circ$ ,  $\alpha_7 = 180^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$

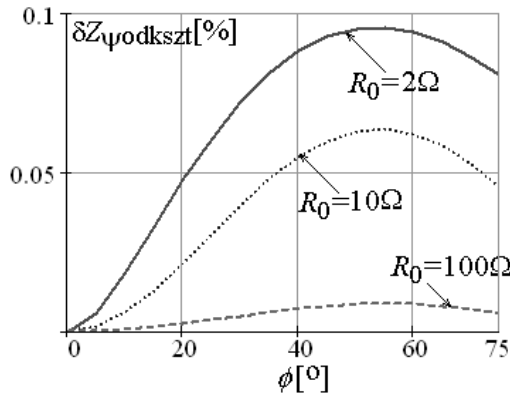


Rys. 4.7. Krzywa napięcia spłaszczona  $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  $\alpha_3 = 0^\circ$ ,  $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 0^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$



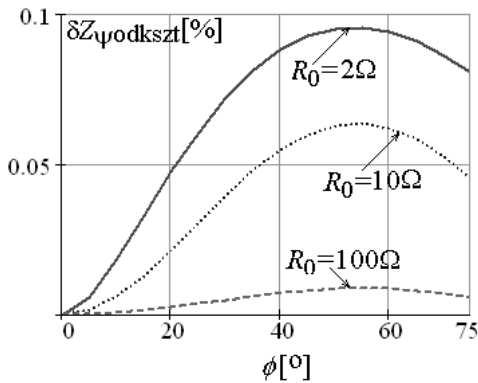
Rys. 4.8. Krzywa napięcia siodłowa  $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  $\alpha_3 = -45^\circ$ ,  $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 0^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$

W przypadku, gdy mierzona krzywa napięcia będzie wyostrzona, błąd pomiaru impedancji  $\delta Z_{\psi\text{odks}}z$ , miernikiem działającym w oparciu o metodę z przesunięciem  $\psi$ , nie przekroczy 0,1%, gdy obciążenie pomiarowe  $R_0$  będzie równe  $2 \Omega$  (rys. 4.9), 0,07% dla  $R_0 = 10 \Omega$  i 0,009% dla  $R_0 = 100 \Omega$ .

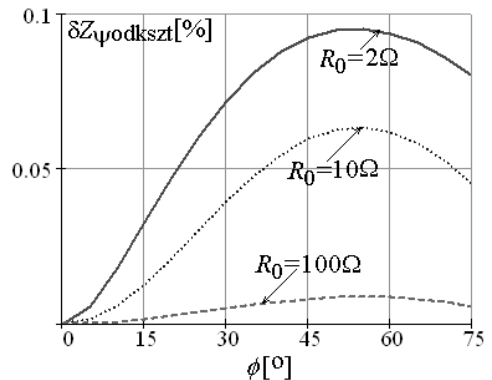


Rys. 4.9. Błąd  $\delta Z_{\psi\text{odksz}} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $T = 0,02 \text{ s}$ ,  $R_0 = 2, 10, 100 \Omega$ ,  $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_5 = 0^\circ$ ,  $\alpha_7 = 180^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$

Błąd pomiaru  $\delta Z_{\psi\text{odksz}}$  przyjmuje podobne wartości, w przypadku, gdy krzywa pomiaru jest spłaszczona (rys. 4.10) i siódłowa (rys. 4.11).



Rys. 4.10. Błąd  $\delta Z_{\psi\text{odksz}} = f(\phi)$  dla danych:  
 $Z = 1 \Omega$ ,  $T = 0,02 \text{ s}$ ,  $R_0 = 1, 10,$   
 $100 \Omega$ ,  $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  
 $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  $\alpha_3 = 0^\circ$ ,  
 $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 0^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$



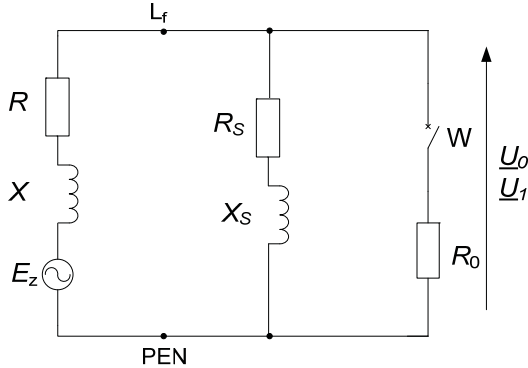
Rys. 4.11. Błąd  $\delta Z_{\psi\text{odksz}} = f(\phi)$  dla danych:  
 $Z = 1 \Omega$ ,  $T = 0,02 \text{ s}$ ,  $R_0 = 1, 10,$   
 $100 \Omega$ ,  $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  
 $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  $\alpha_3 = -45^\circ$ ,  
 $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 0^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$

Wpływ parametrów obwodu badanego na dokładność pomiaru impedancji pętli, czyli zależność od stosunku  $X/R$  oraz kąta fazowego  $\phi$  impedancji  $Z$  jest następujący: gdy pętla ma charakter rezystancyjny (pomiar w obwodach odbiorczych o małych przekrojach zlokalizowanych daleko od źródła zasilania), czyli  $\phi$  bliskie  $0^\circ$ , wówczas wartość błędu od odkształceń  $\delta Z_{\psi\text{odksz}}$  jest równa zero. Wraz ze wzrostem kąta  $\phi$  rośnie wartość błędu  $\delta Z_{\psi\text{odksz}}$ .

W przypadku, gdy w mierzona krzywa będzie odkształcona w dopuszczalnym przez normy [42] przedziale, należy spodziewać się, że maksymalny błąd od odkształceń  $\delta Z_{\psi\text{odksz}}$ , występujący przy pomiarze impedancji pętli miernikiem opartym o metodę z przesunięciem  $\psi$ , nie przekroczy 0,1%, niezależnie od kształtu napięcia w miejscu pomiaru.

## 4.3.1.2. Obciążenie robocze sieci

Istotny wpływ na dokładność pomiaru impedancji pętli  $Z$  mają pracujące w sieci obciążenia robocze. Analizę wpływu obciążeń roboczych na dokładność pomiaru impedancji pętli  $Z$ , miernikiem działającym w oparciu o metodę z przesunięciem  $\psi$ , przeprowadzono dla układu jak na rys. 4.12.



Rys. 4.12. Schemat obwodu badanego w sieci z obciążeniami roboczymi.

Obciążenia robocze występujące w tym układzie zostały zastąpione jedną impedancją  $Z_s$ , złożoną z szeregowo połączonej rezystancji  $R_s$  oraz reaktancji indukcyjnej  $X_s$  i argumentem  $\phi_s$ . Pracujący odbiornik wpływa na spadki napięć w sieci, które powodują, że mierzone napięcie przed załączeniem obciążenia pomiarowego nie jest napięciem źródła zasilania.

Przy otwartym łączniku  $W$  przebieg napięcia  $u_0(t)$  opisuje następująca zależność:

$$u_0(t) = \sqrt{2}U_0 \sin \left[ \omega t + \alpha + \left( \arctg \frac{X_s}{R_s} - \arctg \frac{X_s + X}{R_s + R} \right) \right], \quad (4.26)$$

gdzie fazor napięcia  $\underline{U}_0$  określa wzór:

$$\underline{U}_0 = \frac{E Z_s}{\underline{Z} + \underline{Z}_s}, \quad (4.27)$$

Natomiast przy zamkniętym łączniku  $W$  napięcie  $u_1(t)$  opisuje równanie:

$$u_1(t) = \sqrt{2}U_1 \sin \left[ \omega t + \alpha + \left( -\arctg \frac{X_{zast} + X}{R_{zast} + R} + \arctg \frac{X_{zast}}{R_{zast}} \right) \right], \quad (4.28)$$

gdzie fazor napięcia  $\underline{U}_1$  opisuje następująca zależność:

$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{U}_0 \cdot R_0}{\underline{Z}_{zast} + \underline{Z}}, \quad (4.29)$$

natomiast za  $Z_{zast}$  przyjęto impedancję zastępczą wynikającą z równoległego połączenia  $Z_s$  i  $R_0$ .



Rezystancję  $R_{zast}$  i reaktancję  $X_{zast}$  tej impedancji oraz jej argument  $\phi_{zast}$  opisują wzory:

$$R_{zast} = \frac{R_0(R_S^2 + X_S^2) + R_S R_0^2}{(R_S + R_0)^2 + X_S^2} \quad X_{zast} = \frac{X_S R_0^2}{(R_S + R_0)^2 + X_S^2}, \quad (4.30)$$

$$\phi_{zast} = \arctg \frac{X_{zast}}{R_{zast}}. \quad (4.31)$$

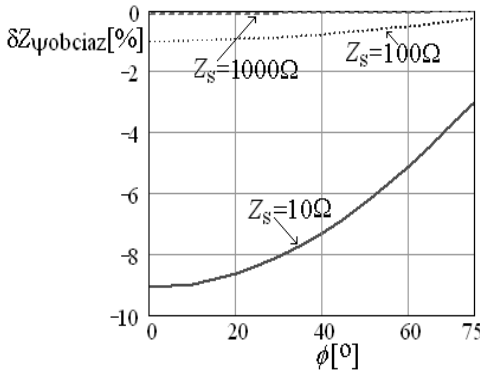
W celu wyznaczenia impedancji  $Z_{\psi obci\alpha z}$  mierzonej w tym układzie zgodnie ze wzorem:

$$Z_{\psi obci\alpha z} = R_0 \sqrt{\left( \frac{U_{0sk}}{U_{1sk}} - 1 \right)^2 + 4 \frac{U_{0sk}}{U_{1sk}} \sin^2 \left( \frac{\psi}{2} \right)}, \quad (4.32)$$

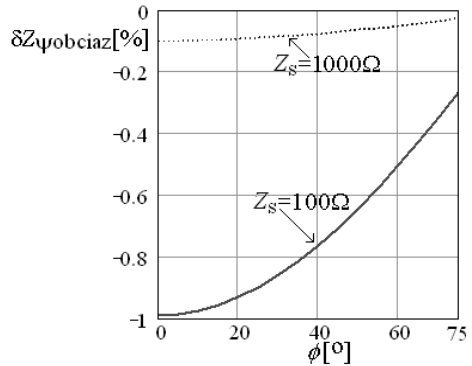
należy obliczyć wartości skuteczne napięć  $u_0(t)$  i  $u_1(t)$  oraz wyznaczyć kąt  $\psi$  pomiędzy napięciem  $u_0(t)$  i  $u_1(t)$  ze wzoru:

$$\psi = \phi_S - \arctg \frac{X_S + X}{R_S + R} + \arctg \frac{X_{zast} + X}{R_{zast} + R} - \phi_{zast}. \quad (4.33)$$

W przypadku, gdy  $Z_S = R_0$ , wówczas błąd pomiaru  $\delta Z_{\psi obci\alpha z}$  może przyjmować duże wartości (rys. 4.13). Wtedy, o ile to możliwe, należy wyłączyć obciążenie robocze, bądź też stosować metodę wektorową z eliminacją wpływu obciążeń roboczych sieci [5].

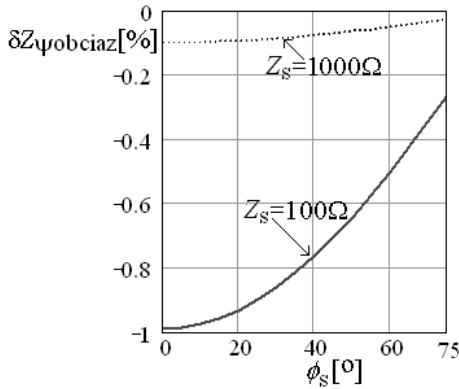


Rys. 4.13. Błąd  $\delta Z_{\psi obci\alpha z} = f(\phi)$  dla danych:  
 $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\phi_S = 0^\circ$ ,  
 $Z_S = 10, 100, 1000 \Omega$

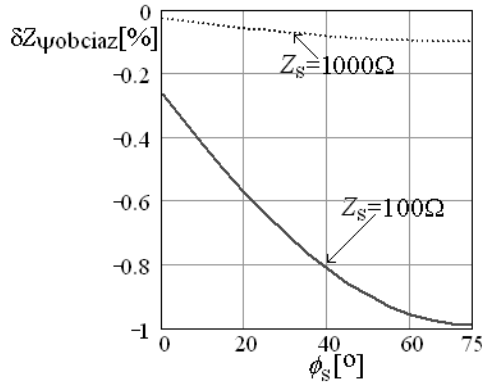


Rys. 4.14. Błąd  $\delta Z_{\psi obci\alpha z} = f(\phi)$  dla danych:  
 $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\phi_S = 0^\circ$ ,  
 $Z_S = 100, 1000 \Omega$

Dla stosunku  $R_0/Z_S = 0,1$  błąd  $\delta Z_{\psi obci\alpha z}$  nie przekracza  $-1\%$  (rys. 4.14), natomiast gdy  $R_0/Z_S = 0,01$  błąd  $\delta Z_{\psi obci\alpha z}$  jest mniejszy od  $-0,15\%$ .



Rys. 4.15. Błąd  $\delta Z_{\psi \text{obci\u0105z}} = f(\phi_s)$  dla danych:  
 $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\phi = 0^\circ$   
 $Z_s = 100, 1000 \Omega$



Rys. 4.16. Błąd  $\delta Z_{\psi \text{obci\u0105z}} = f(\phi_s)$  dla danych:  
 $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\phi = 75^\circ$   
 $Z_s = 100, 1000 \Omega$

Błąd ten przyjmuje mniejsze wartości w przypadku, gdy mierzona pętla ma charakter rezystancyjny (rys. 4.15), czyli kiedy  $\phi = 0^\circ$ , natomiast największe dla  $\phi = 75^\circ$  (rys. 4.16). W rozważaniach dotyczących wyznaczenia całkowitego błędu  $\delta Z_A$  przejęto, że  $\delta Z_{\psi \text{obci\u0105z}}$  nie przekroczy  $-0,15\%$  (dla obciążenia roboczego  $Z_s = 1000 \Omega$ ,  $\phi_s = 75^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ ).

### 4.3.2. Źródła błędów wynikające z parametrów miernika i stosowanej metody

Całkowity błąd  $\delta Z_{\psi B}$  wynikający z budowy miernika i metody pomiarowej (rys. 4.5), przy założeniu braku korelacji pomiędzy poszczególnymi źródłami błędu pomiarowego od B1 do B5, określa zależność:

$$\delta Z_{\psi B} = |\delta Z_{\psi \phi}| + |\delta Z_{\max \psi}|, \quad (4.34)$$

gdzie  $\delta Z_{\psi \phi}$  jest błędem fazowym wynikającym z niedopasowania argumentów  $\phi$  i  $\phi_0$  wyznaczanym z następującej zależności:

$$\delta Z_{\psi \phi} = \frac{Z_\psi - Z}{Z} \cdot 100\%, \quad (4.35)$$

Natomiast błąd  $\delta Z_{\max \psi}$  wyznaczany jest na podstawie funkcji pomiaru. Funkcja pomiaru, zgodnie z zależnością (4.9), zależy od następujących parametrów:

$$Z = f(R_0, E, U, T, \tau) = Z_\psi, \quad (4.36)$$

Zgodnie z prawem przenoszenia błędów [19, 72] bezwzględny błąd pomiaru  $\Delta Z_\psi$  został zdefiniowany następująco<sup>1)</sup>:

<sup>1)</sup> W celu uzyskania poziomu ufności równego jeden, składowe błędów dodano algebraicznie, a nie geometrycznie.

$$\Delta Z_{\psi} = \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial \tau} \Delta \tau + \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial T} \Delta T, \quad (4.37)$$

gdzie:  $\Delta R_0$  – tolerancja wykonania rezystancji obciążenia pomiarowego sprawdzanego przyrządu,  
 $\Delta E, \Delta U$  – błąd pomiaru napięcia odpowiednio przed i po załączeniu obciążenia pomiarowego  $R_0$ ,  
 $\Delta \tau$  – błąd pomiaru przesunięcia między zmierzonymi napięciami,  
 $\Delta T$  – błąd wyznaczenia okresu napięcia sieci.

Wówczas błąd graniczny wyznaczony dla najmniej korzystnego przypadku, czyli wtedy, gdy błędy wartości pośrednich przyjmują jednocześnie wartości maksymalne i mają te same znaki, opisany jest wzorem:

$$\delta Z_{max\psi} = \left| \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial R_0} \frac{R_0}{Z} \delta R_0 \right| + \left| \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial E} \frac{E}{Z} \delta E \right| + \left| \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial U} \frac{U}{Z} \delta U \right| + \left| \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial \tau} \frac{\tau}{Z} \delta \tau \right| + \left| \frac{\partial Z_{\psi}}{\partial T} \frac{T}{Z} \delta T \right| \quad (4.38)$$

W dalszej części tego rozdziału przeprowadzona zostanie analiza wpływu dokładności parametrów wejściowych na dokładność wyznaczenia impedancji pętli.

#### 4.3.2.1. Kąt fazowy badanej impedancji

Błąd fazowy  $\delta Z_{\psi\phi}$  w przypadku pomiaru impedancji pętli metodą z przesunięciem  $\psi$  nie występuje.

Wynika to z zasady pomiaru, która polega na wyznaczeniu modułów dwu napięć, które występują odpowiednio przy włączonym i wyłączonym obciążeniu pomiarowym  $R_0$  oraz kąta przesunięcia fazowego  $\psi$  między tymi napięciami, który to kąt umożliwia wyznaczenie składowych ortogonalnych  $U_R$  i  $U_X$  fazora różnicy napięć  $\underline{U}$ , (rys. 4.1a). Efekt jest taki, jakbyśmy dokonywali pomiaru impedancji pętli metodą klasyczną, w której wyrażenia są opisane przez wielkości zespolone (wzór (3.5)).

Fakt nie występowania błędu  $\delta Z_{\psi\phi}$  stanowi niewątpliwą zaletę tej metody.

#### 4.3.2.2. 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  $10 \Omega$  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% błędu wyznaczenia impedancji pętli.

#### 4.3.2.3. 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  $\Delta E_{\psi}$  i  $\Delta U_{\psi}$ . Na błąd pomiaru napięcia  $E$  wpływ mają następujące czynniki: błąd przetwarzania napięcia przez przetwornik  $\Delta E_{przetw}$ , błąd konwersji a/c sygnału pomiarowego  $\Delta E_{DAQ}$ , błąd  $\Delta E_{sk}$  wynikający z wyznaczenia wartości skutecznej napięcia z niecałkowitej liczby próbkowanych okresów  $(M + \lambda)T$ .

Błąd przetwarzania napięcia przez przetwornik  $\Delta E_{\text{przetw}}$  definiuje się jako:

$$\Delta E_{\text{przetw}} = \delta k \cdot E_{\text{in}}, \quad (4.39)$$

gdzie:  $\delta k$  to błąd względny wyrażony w procentach, napięcia wejściowego  $E_{\text{in}}$ . Wartości tego błędu podawane są przez producenta przetwornika.

Do symulacji wykorzystano dane następujących przetworników firmy LEM, które brano pod uwagę przy projektowaniu systemu: LV-20-P, LV25-P, CV-500. Błędy tych przetworników zostały zebrane na podstawie danych producenta [81] i zestawione w tab. 4.1.

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

**Tablica 4.1**

Błąd całkowity przykładowych przetworników LEM [81]

L.p.	Typ przetwornika	Całkowity błąd pomiaru $\delta k$ [%]	$E_{\text{in}}$ [V]	$\Delta E_{\text{przetw}}$ [V]
1.	LV-20-P	$\pm 1$	230	2,30
2.	LV25-P	$\pm 0,8$		1,84
3.	CV-500	$\pm 0,2$		0,46

Wartość całkowitego błędu  $\Delta E_{\text{DAQ}}$  pomiaru napięcia kartą pomiarową z uwzględnieniem wszystkich wymienionych czynników charakteryzuje następująca zależność [82]:

$$\Delta E_{\text{DAQ}} = \pm (E_{\text{inDAQ}} \cdot \delta E_{\%R}) + (\Delta E_{\text{offset}} + \Delta E_{\text{noise+quant}} + \Delta E_{\text{temp}}), \quad (4.40)$$

Założono zakres zmian temperatury w przedziale od  $+15^{\circ}\text{C}$  do  $35^{\circ}\text{C}$ , a w nim, zgodnie z informacją od producenta, błąd zwany dryftem temperaturowym uwzględniony jest już w błędzie przesunięcia zera  $\delta E_{\text{offset}}$ .

W trakcie projektowania układu pomiarowego miernika impedancji pętli przeanalizowano dokładność pomiaru napięcia następującymi kartami pomiarowymi firmy National Instruments serii E: 12-bitowe 6021 i 6024 oraz 16-bitową 6032. Całkowity błąd pomiaru napięcia  $\Delta E_{\text{DAQ}}$  tymi kartami pomiarowymi dla tych samych warunków obliczono zgodnie ze wzorem (4.40), a wyniki zestawiono w tab. 4.2.

**Tablica 4.2**

Błąd pomiaru napięcia  $\Delta E_{\text{DAQ}}$  oraz jego składowe dla przykładowych kart firmy NI, dla  $E_{\text{inDAQ}} = 5 \text{ V}$  [82]

L.p.	Typ DAQ	$\delta E_{\%R}$ [%]	$\Delta E_{\text{offset}}$ [mV]	$\Delta E_{\text{noise+quant}}$ [mV]	$\Delta E_{\text{DAQ}}$ [mV]
1.	6021	0,021	3,2	1,73	5,9
2.	6024	0,031	3,2	1,95	6,7
3.	6032	0,036	0,2	0,38	2,4

Błąd  $\Delta E_{sk}$  wynikający z wyznaczenia wartości skutecznej napięcia z niecałkowitej liczby spróbkowanych okresów  $(M + \lambda)T$ , gdzie  $M$  – liczba całkowita spróbkowanych okresów  $T$  napięcia, natomiast  $\lambda \in \tilde{\sim}(0, 1)$  – jest częścią ostatniego spróbkowanego okresu napięcia.

W przypadku, gdy napięcie ma sinusoidalny kształt, błąd  $\Delta E_{sk}$  określa następująca zależność [43]:

$$\Delta E_{sk} = \sqrt{2} \left[ \frac{\sqrt{\frac{\sin(2\alpha) - \sin[4\pi(M + \lambda) + 2\alpha]}{(M + \lambda)} - 4\pi}}{4\sqrt{\pi}} - \frac{\sqrt{\frac{\sin(2\alpha) - \sin(4\pi M + 2\alpha)}{M}} - 4\pi}{4\sqrt{\pi}} \right], \quad (4.41)$$

Błąd  $\Delta E_{sk}$  przyjmuje wartość równą 0 dla  $\lambda = 0,25, 0,5, 0,75, 1$ . Natomiast maksymalną wartość  $\Delta E_{sk}$  przyjmuje dla  $\lambda = 0,375$  i dla  $M = 6, \alpha = 0^\circ, E = 5 \text{ V}$ , a wynosi ona  $\Delta E_{sk} = 15 \text{ mV}$ .

W przypadku, gdy mierzone napięcie jest odkształcone, wzór charakteryzujący błąd  $\Delta E_{sk}$  jest znacznie bardziej złożony – opisuje go Nowotny i Sedlacek w [43]. Zgodnie z tym wzorem wyznaczono błąd  $\Delta E_{sk}$ , przyjmując:  $\lambda = 0,375, M = 6, \alpha = 0^\circ, E = 5 \text{ V}$  oraz odkształcenie napięcia o takich współczynnikach udziału i kształtach krzywych jak w rozdziale 4.3.1.1.2. Analiza wskazuje, że wartość błędu  $\Delta E_{sk}$  jest maksymalna dla krzywej wyostrzonej i jest równa  $\Delta E_{sk} = 13 \text{ mV}$ .

Błąd pomiaru napięcia  $\Delta E_{\psi}$  przeliczony do wejścia układu, dla najmniej korzystnego przypadku [41, 72], można wyznaczyć z następującej zależności:

$$\Delta E_{\psi} = |\Delta E_{\text{przetw}}| + |k_u \Delta E_{\text{DAQ}}| + |k_u \Delta E_{sk}|, \quad (4.42)$$

gdzie:  $k_u$  – wzmocnienie przetwornika napięcia.

Z danych zamieszczonych w tabelicy 4.3 wynika, że najbardziej znaczącą składową błędów pomiaru napięcia  $\Delta E_{\psi}$  jest błąd przetwornika  $\Delta E_{\text{przetw}}$  oraz że bezcelowe jest zastosowanie przetworników a/c o rozdzielczości ponad 12-bitowej, bowiem błąd  $\Delta E_{\text{DAQ}}$  dla kart 12-bitowych jest o 3 rzędy mniejszy od błędów przetwornika  $\Delta E_{\text{przetw}}$ . Dlatego w dalszych rozważaniach uwzględniona zostanie karta pomiarowa firmy National Instruments typu 6024E.

**Tabela 4.3**

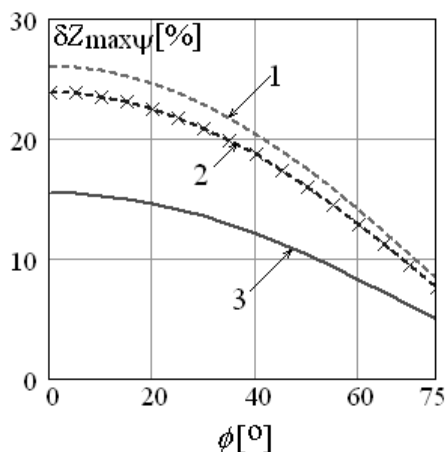
Błąd pomiaru napięcia  $\Delta E$  dla przykładowych przetworników i kart pomiarowych

L.p.	Przetwornik LEM	$k_u$	Typ DAQ	$\Delta E_{\text{przetw}}$ [V]	$\Delta E_{\text{DAQ}}$ [mV]	$\Delta E_{sk}$ [mV]	$\Delta E_{\psi}$ [V]
1.	LV-20-P	66	6021	2,3	5,9	15 krzywa sinusoidalnego kształtu	3,69
2.			6024		6,7		3,75
3.			6032		2,4		3,46
4.	LV25-P		6021	1,84	5,9		3,23
5.			6024		6,7		3,29
6.			6032		2,4		3,00

cd. tab. 4.3

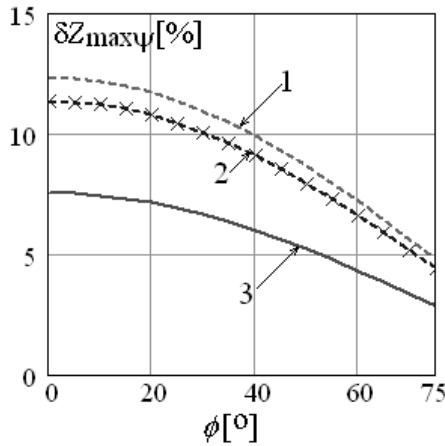
L.p.	Przetwornik LEM	$k_u$	Typ DAQ	$\Delta E_{\text{przetw}}$ [V]	$\Delta E_{\text{DAQ}}$ [mV]	$\Delta E_{\text{sk}}$ [mV]	$\Delta E_{\psi}$ [V]
7.	CV-500	50	6021	0,46	5,9	13 krzywa odkształcona	1,50
8.			6024		6,7		1,54
9.			6032		2,4		1,33
10.	LV-20-P	66	6021	2,3	5,9		3,56
11.			6024		6,7		3,61
12.			6032		2,4		3,33
13.	LV25	66	6021	1,84	5,9		3,10
14.			6024		6,7		3,15
15.			6032		2,4		2,87
16.	CV-500	50	6021	0,46	5,9		1,41
17.			6024		6,7		1,45
18.			6032		2,4		1,23

Z rys. 4.17 widać, że układ realizujący tę metodę jest bardzo wrażliwy na dokładność wyznaczenia napięć i że przy stosunku pomiarowym  $Z/R_0 = 0,1$ . Błąd  $\delta Z_{\max\psi}$  w przypadku zastosowania przetworników LV-20-P i LV25-P przyjmuje duże wartości ponad 20%, dyskwalifikując zastosowanie tych przetworników w opisanym układzie pomiarowym miernika impedancji pętli. Błąd  $\delta Z_{\max\psi}$  przyjmuje także dużą wartość, gdy rolę przetwornika napięcia będzie pełnił przetwornik CV-500,  $\delta Z_{\max\psi} = 16\%$ .



Rys. 4.17. Błąd  $\delta Z_{\max\psi} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\Delta U_{\psi} = 1,54 \text{ V}$ ,  
1-LV20-P, 2-LV25P, 3-CV-500

Dlatego w celu zwiększenia dokładności pomiaru zasadne jest zwiększenie wartości prądu pomiarowego. Rysunek 4.18 przedstawia wartość błędu  $\delta Z_{\max\psi}$  w funkcji argumentu  $\phi$  dla  $Z/R_0 = 0,25$ .

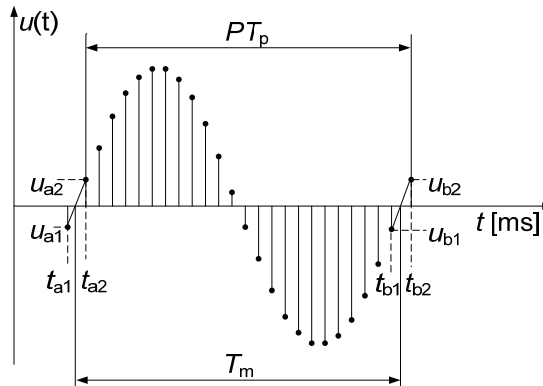


Rys. 4.18. Błąd  $\delta Z_{\max\psi} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 4 \Omega$ ,  $\Delta U_\psi = 1,54 \text{ V}$ ,  
1-LV20-P, 2-LV25P, 3-CV-500

Wykorzystanie przetwornika napięciowego CV-500 spowoduje, że błąd pomiaru napięcia przełoży się maksymalnie na 7,5% niedokładność wyznaczenia impedancji pętli (rys. 4.18).

#### 4.3.2.4. Dokładność wyznaczenia okresu $T$ mierzonego napięcia

Okresu  $T$  sygnału mierzonego wyznacza się metodą opierającą się na próbkowaniu sygnału z aproksymacją chwil przejścia przez zero (rys. 4.19). Proces pomiaru rozpoczyna się od próbkowania mierzonego sygnału z zadaną częstotliwością  $f_p = 1/T_p$ .



Rys. 4.19. Próbkowanie sygnału z aproksymacją chwil przejścia przez zero

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

Wartość okresu mierzonego  $T_m$  określa zależność [13]:

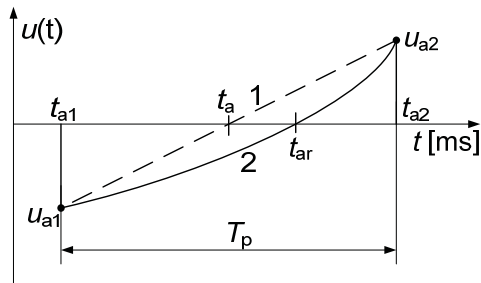
$$T_m = P \cdot T_p + t_{a2} - t_{b2} \quad (4.43)$$

gdzie:  $P$  – liczba próbek w okresie sygnału,  
 $t_{ai}$ ,  $t_{bi}$  – chwile pobierania próbek  $u_{ai}$  i  $u_{bi}$ .

Korzystając z podobieństwa trójkątów, można obliczyć stosunek  $T_m/T_p$  jako:

$$\frac{T_m}{T_p} = P + \frac{u_{a2}}{u_{a2} - u_{a1}} - \frac{u_{b2}}{u_{b2} - u_{b1}} \quad (4.44)$$

Dokładność pomiaru okresu zależna jest od błędu związanego z aproksymacją sinusoidy linią prostą (rys. 4.20).



Rys. 4.20. Błąd metody próbkowania sygnału z aproksymacją chwil przejścia przez zero:  
1 – aproksymacja linią prostą, 2 – sygnał rzeczywisty

Wartość tego błędu jest wprost proporcjonalna do różnicy 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:

$$\delta T_m = \frac{t_{ar} - t_a}{T_p} + \frac{t_{br} - t_b}{T_p}, \quad (4.45)$$

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

Wartości miejsc zerowych  $t_{ar}$  i  $t_{br}$  zmieniają się w przedziale  $\langle 0,1T_p; T_p \rangle$ . Składowe błędy przy przejściu przez zero w punkcie  $a$  i  $b$  mają taką samą wartość, dlatego wystarczy wyznaczyć wartość błędu przy jednym przejściu przez zero sygnału i wynik pomnożyć przez 2, czyli:

$$\delta T_m = 2 \cdot \left( \frac{t_{ar} - t_a}{T_p} \right) \cdot 100 \quad (4.46)$$

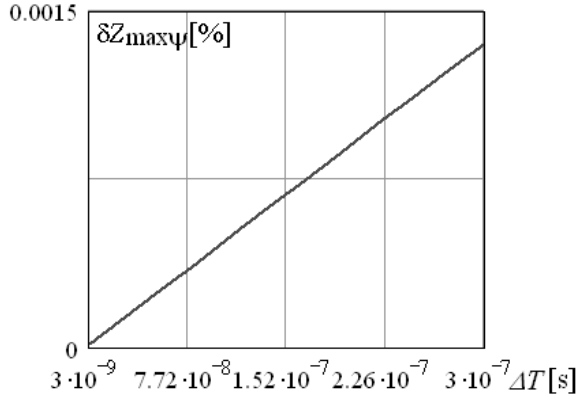
Błąd  $\delta T_m$  przyjmuje zerowe wartości w połowie między chwilami próbkowania oraz w chwilach próbkowania, natomiast wartości maksymalne, w chwilach gdy  $t_{ar} = 0,25T_p$  oraz  $0,75T_p$  [69].

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

Uwzględniając ten fakt i przyjmując  $T_p = 0,5 \mu s$  (400 próbek na okres napięcia),  $\Delta E_{DAQ} = 2 \text{ mV}$ , otrzymujemy dla sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz błąd pomiaru okresu metodą aproksymacyjną równy  $\Delta T = 3 \text{ ns}$ , natomiast w przypadku odkształcenia krzywej napięcia (przyjmując parametry takie jak w rozdziale 4.3.1.1) błąd ten przyjmuje maksymalną wartość dla krzywej siodłowej równą  $\Delta T = 0,263 \mu s$ .

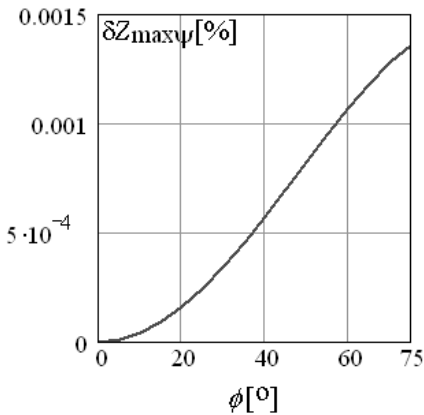


Dlatego też w dalszych analizach uwzględniony będzie błąd pomiaru okresu  $\Delta T$  w przedziale od  $0,003 \mu\text{s}$  do  $0,3 \mu\text{s}$ . Rysunek 4.21 przedstawia błąd wyznaczenia impedancji pętli zwarcia w zależności od niedokładności pomiaru okresu.

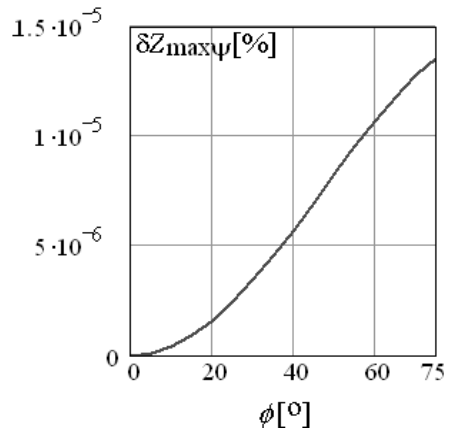


Rys. 4.21. Błąd  $\delta Z_{\max\psi} = f(\Delta T)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\phi = 75^\circ$

Błąd pomiaru okresu  $\Delta T$  rzędu  $0,3 \mu\text{s}$  przekłada się na  $1,5 \cdot 10^{-3}\%$  błąd pomiaru impedancji pętli (rys. 4.22). Natomiast niedokładność pomiaru okresu rzędu  $0,003 \mu\text{s}$  praktycznie nie wpływa na dokładność wyznaczenia impedancji pętli, bowiem  $\delta Z_{\max\psi}$  jest wówczas mniejsze od  $1,5 \cdot 10^{-5}\%$  (rys. 4.23).



Rys. 4.22. Błąd  $\delta Z_{\max\psi} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\Delta T = 0,3 \mu\text{s}$

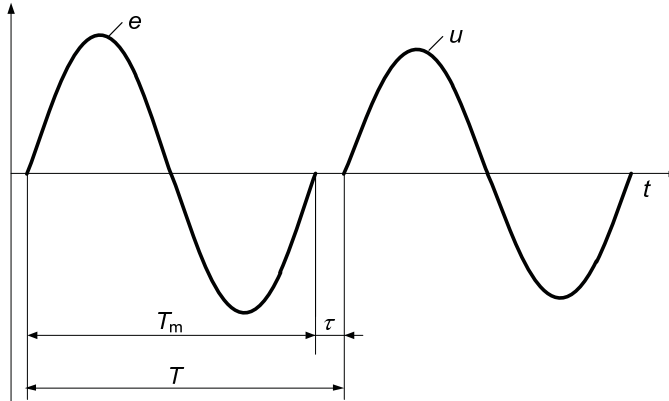


Rys. 4.23. Błąd  $\delta Z_{\max\psi} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\Delta T = 0,003 \mu\text{s}$

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

4.3.2.5. Dokładność pomiaru przesunięcia  $\tau$  pomiędzy mierzonymi napięciami

Zgodnie z przebiegami przedstawionymi na rysunku 4.24 wielkościami mierzonymi są:  $T_m$  – okres napięcia,  $\tau$  – przesunięcie fazowe po załączeniu obciążenia pomiarowego oraz  $T_\tau$  – okres napięcia uwzględniający przesunięcie fazowe.



Rys. 4.24. Przebieg mierzonego sygnału

Przesunięcie fazowe  $\tau$  określa zależność:

$$\tau = T_\tau - T_m, \quad (4.47)$$

gdzie:

$$T_\tau = T' \pm \Delta T_1 \pm \Delta T_2, \quad (4.48)$$

$$T_m = T'_m \pm \Delta T_{m1} \pm \Delta T_{m2}, \quad (4.49)$$

$T'_m, T'$  – rzeczywista wartość okresu  $T_m$  oraz  $T_\tau$

$\Delta T_1, \Delta T_2$  – błędy bezwzględne pomiaru okresu  $T$ ,

$\Delta T_{m1}, \Delta T_{m2}$  – błędy bezwzględne pomiaru okresu  $T_m$ .

Podstawiając zależności (4.48) i (4.49) do wzoru (4.47), otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \tau &= T_\tau - T_m = T' \pm \Delta T_1 \pm \Delta T_2 - (T'_m \pm \Delta T_{m1} \pm \Delta T_{m2}) = \\ &= T' - T'_m \pm \Delta T_1 \pm \Delta T_2 \mp \Delta T_{m1} \mp \Delta T_{m2} = \\ &= \tau' \pm \Delta T_1 \pm \Delta T_2 \mp \Delta T_{m1} \mp \Delta T_{m2}. \end{aligned} \quad (4.50)$$

Zakładając, że

$$\Delta T_1 = \Delta T_{m1}, \quad (4.51)$$

Uwzględniając zależność (4.51), wzór (4.50) przyjmuje następującą postać:

$$\tau = \tau' \pm \Delta T_2 \mp \Delta T_{m2} \quad (4.52)$$

Okres  $T_\tau$  oraz przesunięcie  $\tau$ , zgodnie ze wzorami (4.47) i (4.48), przyjmuje wartość maksymalną, gdy:

$$T_\tau = T' \pm \Delta T_1 \pm \Delta T_2 \stackrel{\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T}{=} T' + 2\Delta T, \quad (4.53)$$

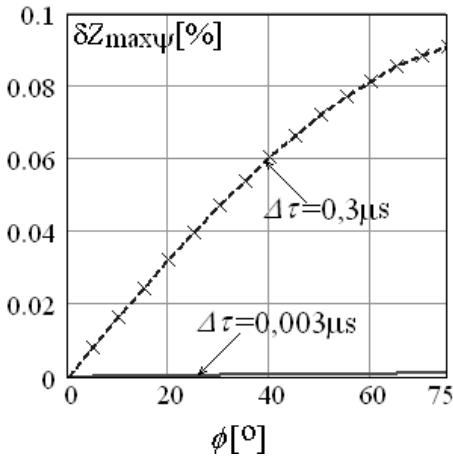
$$\tau = \tau' \pm \Delta T_2 \mp \Delta T_{m2} \stackrel{\Delta T_2 = -\Delta T_{m2} = \Delta T}{=} \tau'' + 2\Delta T, \quad (4.54)$$

Wyznaczając ze wzoru (4.53)  $2\Delta T = T_\tau - T'$  i podstawiając do (4.54), otrzymuje się, że:

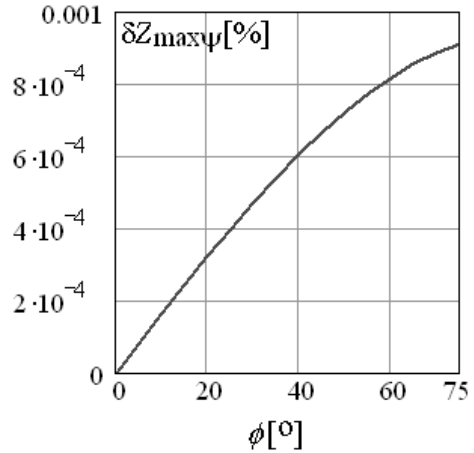
$$\tau - \tau' = T_\tau - T' \Rightarrow \Delta \tau = \Delta T \quad (4.55)$$

co dowodzi, że błąd bezwzględny pomiaru przesunięcia fazowego  $\Delta \tau$  oraz błąd bezwzględny pomiaru okresu napięcia  $\Delta T$  są sobie równe. Uwzględniając to oraz wyniki analiz przeprowadzonych w poprzednim podrozdziale, zgodnie z którymi  $\Delta \tau$  należy do przedziału  $\langle 0,003 \mu\text{s}, 0,3 \mu\text{s} \rangle$ , przyjęto, że  $\Delta \tau$  zmienia się w takim samym zakresie.

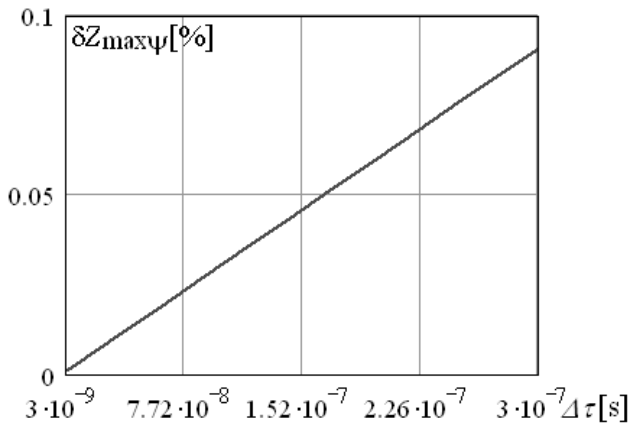
Wówczas błąd pomiaru impedancji  $\delta Z_{\max \psi}$  zmienia się odpowiednio w zakresie od 0,001% (rys. 4.26) do 0,1% (rys. 4.25).



Rys. 4.25. Błąd  $\delta Z_{\max \psi} = f(\phi)$  dla danych:  
 $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\Delta \tau = 0,003, 0,3 \mu\text{s}$



Rys. 4.26. Błąd  $\delta Z_{\max \psi} = f(\phi)$  dla danych:  
 $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\Delta \tau = 0,003 \mu\text{s}$



Rys. 4.27. Błąd  $\delta Z_{\max \psi} = f(\Delta \tau)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\phi = 75^\circ$

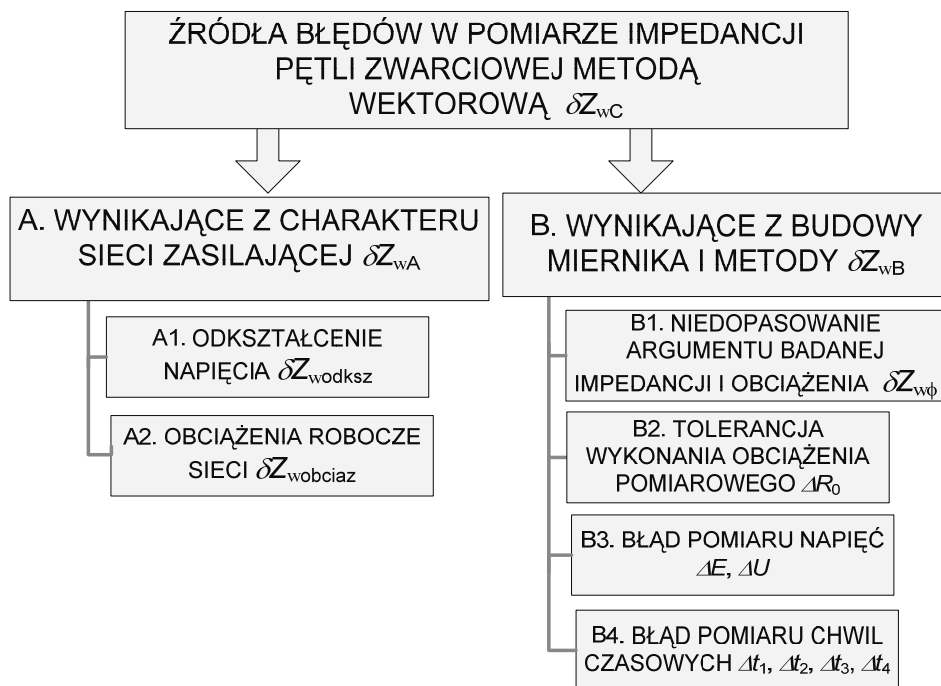
Metoda z przesunięciem  $\psi$  pomiaru impedancji pętli zwarcia jest bardziej wrażliwa na niedokładność wyznaczenia przesunięcia między napięciami  $\Delta\tau$  niż na niedokładność pomiaru okresu  $\Delta T$ . Wniosek ten potwierdza rys. 4.27, który wskazuje, że dla przyjętych danych błąd  $\delta Z_{\max\psi}(\Delta\tau)$  nie przekracza 0,1%, dla tych samych danych  $\delta Z_{\max\psi}(\Delta T)$  nie przekracza 0,0015% (rys. 4.21).

#### 4.4. Analiza metrologiczna metody wektorowej

Celem analizy metrologicznej metody wektorowej jest, tak samo jak w przypadku metody z przesunięciem  $\psi$ , sprawdzenie, które z parametrów obwodu badanego i miernika decydująco wpływają na dokładność pomiaru.

Przeprowadzono jednokierunkową analizę wrażliwości umożliwiającą kolejno i indywidualnie ocenić wpływ każdej wielkości wejściowej na dokładność pomiaru impedancji pętli zwarcia. Wyniki tych analiz pozwolą sprecyzować, jakiego maksymalnie błędu pomiarowego może spodziewać się użytkownik, mierząc impedancję pętli w określonych warunkach, metodą wektorową.

Na rysunku 4.28 przedstawiono źródła błędów występujące podczas pomiaru impedancji pętli zwarcia metodą wektorową. W następnej części tego rozdziału zostały one poddane dalszej analizie. Założono, że odchylenia i wahania napięcia oraz stany przejściowe nie wpływają na dokładność pomiaru.



Rys. 4.28. Uwzględnione w analizie źródła błędów w pomiarze impedancji pętli zwarcia metodą wektorową

W celu określenia całkowitego błędu  $\delta Z_{wC}$  pomiaru impedancji każdą z metod przyjęto, że źródła błędów – wynikające z charakteru sieci zasilającej  $\delta Z_{wA}$  oraz budowy miernika i przyjętej metody pomiaru  $\delta Z_{wB}$  nie są ze sobą skorelowane, wobec czego całkowity błąd wyznaczenia impedancji  $\delta Z_{wC}$  opisuje zależność:

$$\delta Z_{wC} = |\delta Z_{wA}| + |\delta Z_{wB}|, \quad (4.56)$$

gdzie na błąd  $\delta Z_A$  składają się czynniki A1 i A2 wymienione na rysunku 4.28. W tym wypadku przyjęto również, że każdy z czynników A1 i A2 nie jest skorelowany i wówczas:

$$\delta Z_{wA} = |\delta Z_{wodksz}| + |\delta Z_{wobciaz}|, \quad (4.57)$$

gdzie: błędy  $\delta Z_{wodksz}$ ,  $\delta Z_{wobciaz}$  wyznaczane są z następujących zależności:

$$\delta Z_{wodksz} = \frac{Z_{wodksz} - Z}{Z} \cdot 100\%, \quad \delta Z_{wobciaz} = \frac{Z_{wobciaz} - Z}{Z} \cdot 100\% \quad (4.58)$$

Natomiast błąd  $\delta Z_{wB}$  wynikający z budowy miernika i metody pomiaru wyznaczono na podstawie funkcji pomiaru.

Przedstawione w następnej części tego rozdziału wyniki analizy metrologicznej metody wektorowej uzyskano na podstawie symulacji komputerowych przeprowadzonych w programie MathCad.

Podczas przeprowadzania tych analiz założono, że występuje tylko jedno źródło błędów pomiaru impedancji pętli zwarciowej – to aktualnie analizowane, natomiast inne błędy w tym czasie nie występują.

#### 4.4.1. Źródła błędów wynikające z charakteru obwodu badanego

W celu określenia wrażliwości metody wektorowej na różne czynniki wynikające z charakteru obwodu badanego skorzystano ze wzorów (4.57) i (4.58). W indeksie każdego z tych wzorów „dodano” literę *w* – oznaczając tym samym, że wartość impedancji została wyznaczona metodą wektorową.

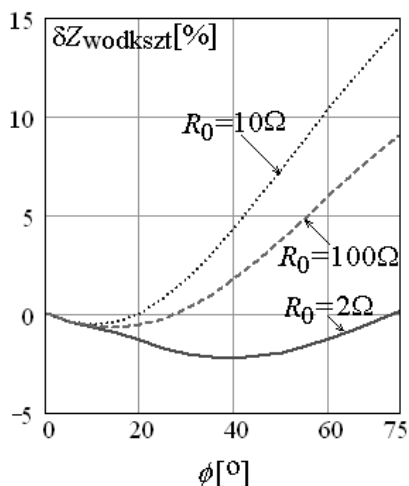
Dokonując analiz, przyjęto, że:  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z = 1 \text{ } \Omega$ ,  $R_0 = 10 \text{ } \Omega$ ,  $t_1 = 20T_p$ ,  $N = 20000$  próbek.

##### 4.4.1.1. Odształcenie krzywej napięcia i parametry obwodu badanego

Do analiz przyjęto, tak samo jak w przypadku miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem  $\psi$ , że w mierzonej krzywej napięcia jednocześnie występują harmoniczne: trzecia, piąta, siódma, dziewiąta, jedenasta i trzynasta. Obliczenia wykonano przy takich samych współczynnikach udziału, jak w rozdziale 4.3.1.1. oraz dla takich samych typów krzywych, czyli: wyostrzonej, spłaszczonej i siodłowej.

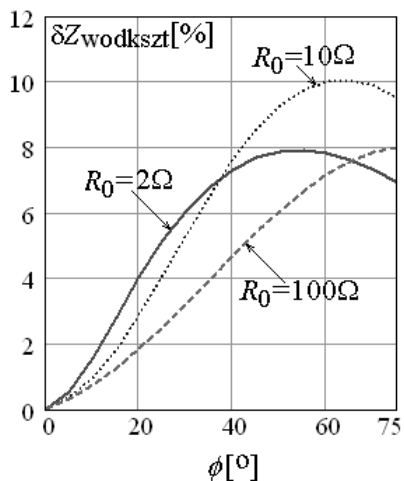
W przypadku, gdy mierzone napięcie ma kształt krzywej wyostrzonej, wartość błędu  $\delta Z_{wodksz}$  może dochodzić do 15% dla  $R_0 = 10 \text{ } \Omega$ , co więcej, błąd ten przyjmuje zarówno wartości dodatnie, jak i ujemne (rys. 4.29).

Należy pamiętać, że błędy ujemne są szczególnie niebezpieczne ze względu na fakt, że możliwe jest dopuszczenie do eksploatacji urządzenia o nieskutecznej ochronie przeciwporażeniowej.



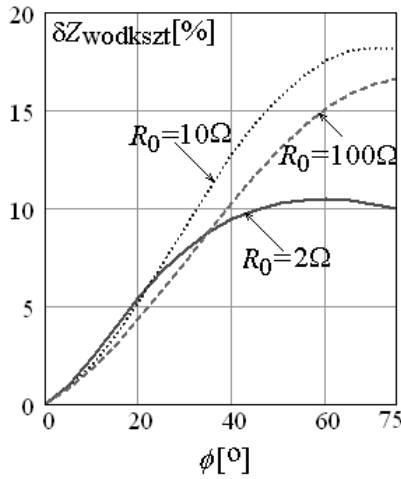
Rys. 4.29. Błąd  $\delta Z_{\text{wodksz}} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 1, 10, 100 \Omega$ ,  $a_3 = 0,03$ ,  
 $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  
 $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_5 = 0^\circ$ ,  $\alpha_7 = 180^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$

Najmniejsze wartości błąd  $\delta Z_{\text{wodksz}}$  przyjmuje wówczas, gdy spróbkowane napięcie ma kształt krzywej spłaszczonej (rys. 4.30).



Rys. 4.30. Błąd  $\delta Z_{\text{wodksz}} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 1, 10, 100 \Omega$ ,  
 $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  
 $\alpha_3 = 0^\circ$ ,  $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 0^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$

Wówczas błąd  $\delta Z_{\text{wodksz}}$  nie przekracza 10% i w całym zakresie kąta  $\phi$  jest dodatni. W całym zakresie kąta  $\phi$  błąd  $\delta Z_{\text{wodksz}}$  jest również dodatni, gdy mierzone napięcie ma kształt siodłowy (rys. 4.31).



Rys. 4.31. Błąd  $\delta Z_{\text{wodkksz}} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 1, 10, 100 \Omega$ ,  
 $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  
 $\alpha_3 = -45^\circ$ ,  $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 0^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$

Jednakże w przypadku krzywej siodłowej błąd  $\delta Z_{\text{wodkksz}}$  przyjmuje największe wartości przekraczające 18%, gdy rezystancja obciążenia pomiarowego  $R_0$  jest równa  $10 \Omega$ .

Zmniejszenie błędu  $\delta Z_{\text{wodkksz}}$  tą metodą jest możliwe poprzez wyznaczenie impedancji  $Z_w$  jako wartości średniej impedancji  $Z_{w\acute{s}}$  obliczonych za okres napięcia, zgodnie z zależnością:

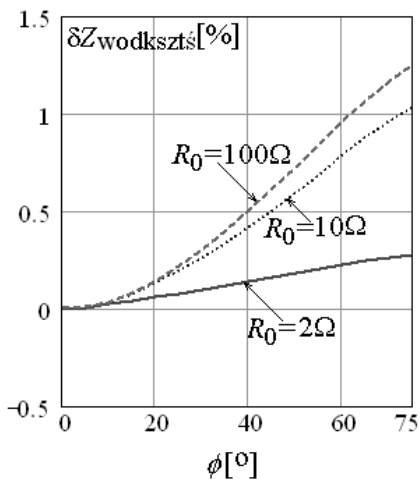
$$Z_{w\acute{s}} = \frac{\sum_{i=0}^{N_T} R_0 \sqrt{\frac{\left[ E_c \left( t_{1_i} + \frac{T}{4} \right) - U_c \left( t_{1_i} + \frac{T}{4} + kT \right) \right]^2 + \left[ E_b(t_{1_i}) - U_b(t_{1_i} + kT) \right]^2}{U_c^2 \left( t_{1_i} + \frac{T}{4} + kT \right) + U_b^2(t_{1_i} + kT)}}}{N_T}, \quad (4.59)$$

gdzie  $N_T$  jest oznaczona liczbę próbek przypadającą na 1 okres napięcia mierzonego.

Wówczas błąd pomiaru impedancji  $\delta Z_{\text{wodkksz}}$  jest wówczas wyznaczany z następującego wzoru:

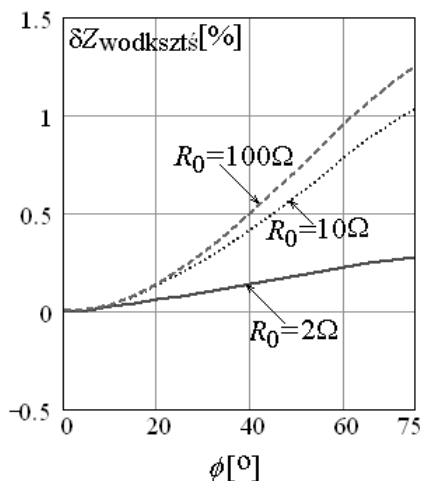
$$\delta Z_{\text{wodkksz}} = \frac{Z_{w\acute{s}} - Z}{Z} \cdot 100\%, \quad (4.60)$$

Postępując w ten sposób, dla krzywej wyostrzonej udało się zmniejszyć błąd  $\delta Z_{\text{wodkksz}}$  10-krotnie do wartości 1,5% (rys. 4.32).



Rys. 4.32. Błąd  $\delta Z_{\text{wodkzs}} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 1, 10, 100 \Omega$ ,  
 $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  
 $\alpha_3 = 180^\circ$ ,  $\alpha_5 = 0^\circ$ ,  $\alpha_7 = 180^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$

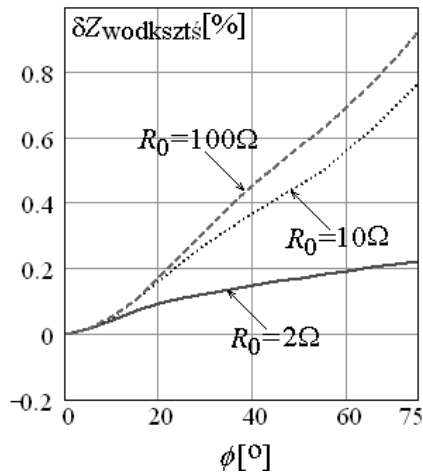
W przypadku, gdy napięcie mierzone ma kształt krzywej spłaszczonej, a impedancja wyznaczana jest ze wzoru (4.59) błąd pomiaru  $\delta Z_{\text{wodkzs}}$  również będzie znacznie mniejszy (rys. 4.33), nie przekroczy 1,25% dla  $R_0 = 100 \Omega$ .



Rys. 4.33. Błąd  $\delta Z_{\text{wodkzs}} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 1, 10, 100 \Omega$ ,  
 $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  
 $\alpha_3 = 0^\circ$ ,  $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 0^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$

Błąd  $\delta Z_{\text{wodkzs}}$  przyjmuje najmniejsze wartości wtedy, gdy krzywa napięcia ma kształt siodłowy (rys. 4.34), nie przekracza on wówczas 0,9%.





Rys. 4.34. Błąd  $\delta Z_{\text{wodkss}} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_0 = 1, 10, 100 \Omega$ ,  
 $a_3 = 0,03$ ,  $a_5 = 0,02$ ,  $a_7 = 0,01$ ,  $a_9 = 0,0025$ ,  $a_{11} = 0,0075$ ,  $a_{13} = 0,01$ ,  
 $\alpha_3 = -45^\circ$ ,  $\alpha_5 = 180^\circ$ ,  $\alpha_7 = 0^\circ$ ,  $\alpha_9 = \alpha_{11} = \alpha_{13} = 0^\circ$

Należy zwrócić uwagę, że zawsze wartość błędu, zarówno  $\delta Z_{\text{wodkss}}$  jak i  $\delta Z_{\text{wodkss}}$  jest równa zero dla  $\phi = 0^\circ$ . Tak więc, podczas pomiaru impedancji pętli o charakterze rezystancyjnym (obwody odbiorcze o małych przekrojach, zlokalizowane daleko od źródła zasilania) kształt krzywej napięcia nie wpływa na dokładność pomiaru.

Natomiast przy pomiarze impedancji pętli o stosunku  $R/X \ll 1$  (układy rozdzielcze, podstacje, blisko transformatora zasilającego) fakt, że krzywa napięcia jest odkształcona, powoduje występowanie błędu pomiaru.

Analizując parametry obwodu badanego dla miernika działającego zgodnie z metodą wektorową, im mniejszy stosunek  $Z/R_0$ , tym większa dokładność pomiarów, odwrotnie niż w sytuacji, gdy impedancja pętli mierzona jest przez przyrząd działający w oparciu o metodę z przesunięciem  $\psi$ .

#### 4.4.1.2. Obciążenie robocze sieci

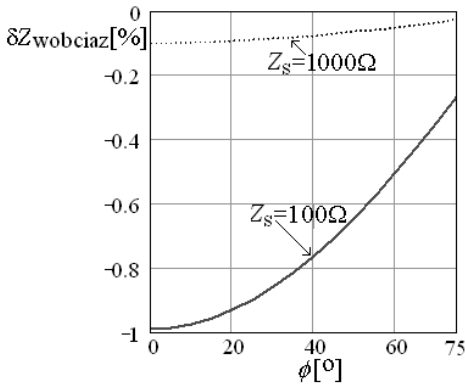
Badania wpływu obciążenia roboczego sieci przeprowadzono dla obwodu pomiarowego jak na rysunku 4.12, w którym  $Z_S$  pełni rolę impedancji roboczej. Przebiegi napięcia  $u_0(t)$  przed i  $u_1(t)$  po załączeniu obciążenia pomiarowego  $R_0$  opisują odpowiednio zależności (4.26) i (4.28). W obwodzie tym impedancja pętli  $Z_{\text{wobcziaz}}$  wyznaczana jest analogicznie jak ze wzoru (4.18):

$$Z_{\text{wobcziaz}} = R_0 \sqrt{\frac{(E_{\text{cob}} - U_{\text{cob}})^2 + (E_{\text{bob}} - U_{\text{bob}})^2}{U_{\text{cob}}^2 + U_{\text{bob}}^2}}, \quad (4.61)$$

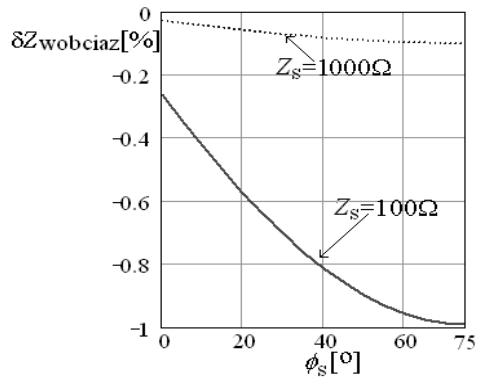
gdzie chwilowe wartości napięć odpowiednio opisują zależności:

$$E_{\text{bob}} = u_0(t_1), \quad E_{\text{cob}} = u_0(t_2), \quad U_{\text{bob}} = u_1(t_3), \quad U_{\text{cob}} = u_1(t_4) \quad (4.62)$$

Rozważając sytuację, w której obciążenie robocze  $Z_S$  ma charakter czysto rezystancyjny, czyli  $\phi_S = 0^\circ$ , błąd  $\delta Z_{\text{wobcziaz}}$  może osiągnąć  $-1\%$  przy stosunku  $R_0/Z_S = 0,1$  (rys. 4.35), a dla  $R_0/Z_S = 0,01$  nie przekracza  $-0,15\%$  (rys. 4.36).



Rys. 4.35. Błąd  $\delta Z_{\text{wobci\u0105z}} = f(\phi)$  dla danych:  
 $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\phi_s = 0^\circ$ ,  $Z_s = 100, 1000 \Omega$



Rys. 4.36. Błąd  $\delta Z_{\text{wobci\u0105z}} = f(\phi_s)$  dla danych:  
 $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\phi = 0^\circ$ ,  $Z_s = 100, 1000 \Omega$

Błąd  $\delta Z_{\text{wobci\u0105z}}$  przyjmuje największą wartość, w przypadku gdy  $R/X \ll 1$  i jednocześnie  $R_s/X_s \ll 1$  (rys. 4.35 i rys. 4.36), natomiast najmniejszą – w przypadku rezystancyjnego charakteru zarówno mierzonej pętli, jak i obciążenia roboczego oraz przy stosunku  $R_0/Z_s < 0,01$  (rys. 4.36).

Wyniki tych analiz są zbieżne z wynikami uzyskanymi dla miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem  $\psi$  (rys. 4.15). Można więc stwierdzić, że wpływ obciążeń roboczych w obu metodach jest podobny.

#### 4.4.2. Źródła błędów wynikające z parametrów miernika i stosowanej metody

Całkowity błąd  $\delta Z_{\text{WB}}$  wynikający z budowy miernika i metody pomiarowej (rys. 4.5), zakładając brak korelacji pomiędzy źródłami błędu pomiaru od B1 do B3 i B6, określa zależność:

$$\delta Z_{\text{WB}} = \left| \delta Z_{\text{w}\phi} \right| + \left| \delta Z_{\text{max w}} \right|, \quad (4.63)$$

gdzie  $\delta Z_{\text{w}\phi}$  jest błędem fazowym wynikającym z niedopasowania argumentów pętli zwarcia  $\phi$  i obciążenia pomiarowego  $\phi_0$ , wyznaczanym z następującej zależności:

$$\delta Z_{\text{w}\phi} = \frac{Z_w - Z}{Z} \cdot 100\%, \quad (4.64)$$

Natomiast błąd  $\delta Z_{\text{max w}}$  wyznaczany jest na podstawie funkcji pomiaru. Funkcja pomiaru, zgodnie z zależnością (4.65), zależy od następujących parametrów:

$$Z = f(R_0, E_b, E_c, U_b, U_c, t_1, t_2, t_3, t_4) = Z_w \quad (4.65)$$

Zgodnie z prawem przenoszenia błędów [19, 72] bezwzględny błąd pomiaru  $\Delta Z_w$  jest określony zależnością:

$$\begin{aligned} \Delta Z_w = & \frac{\partial Z_w}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial Z_w}{\partial E_b} \Delta E_b + \frac{\partial Z_w}{\partial E_c} \Delta E_c + \frac{\partial Z_w}{\partial U_b} \Delta U_b + \frac{\partial Z_w}{\partial U_c} \Delta U_c + \\ & + \frac{\partial Z_w}{\partial t_1} \Delta t_1 + \frac{\partial Z_w}{\partial t_2} \Delta t_2 + \frac{\partial Z_w}{\partial t_3} \Delta t_3 + \frac{\partial Z_w}{\partial t_4} \Delta t_4, \end{aligned} \quad (4.66)$$

gdzie:  $\Delta R_0$  – tolerancja wykonania rezystancji obciążenia pomiarowego sprawdzanego przyrządu,  
 $\Delta E_b, \Delta E_c, \Delta U_b, \Delta U_c$  – 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  $E_b, E_c, U_b, U_c$ .

Błąd graniczny  $\delta Z_{\max w}$  jest opisany następującym wzorem:

$$\begin{aligned} \delta Z_{\max w} = & \left| \frac{\partial Z_w}{\partial R_0} \frac{R_0}{Z} \delta R_0 \right| + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial E_b} \frac{E_b}{Z} \delta E_b \right| + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial E_c} \frac{E_c}{Z} \delta E_c \right| + \\ & + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial U_b} \frac{U_b}{Z} \delta U_b \right| + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial U_c} \frac{U_c}{Z} \delta U_c \right| + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial t_1} \frac{t_1}{Z} \delta t_1 \right| + \\ & + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial t_2} \frac{t_2}{Z} \delta t_2 \right| + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial t_3} \frac{t_3}{Z} \delta t_3 \right| + \left| \frac{\partial Z_w}{\partial t_4} \frac{t_4}{Z} \delta t_4 \right|. \end{aligned} \quad (4.67)$$

W dalszej części tego rozdziału przeprowadzona zostanie analiza wpływu dokładności poszczególnych parametrów wejściowych na dokładność wyznaczenia impedancji pętli metodą wektorową. Przedstawione wyniki są wynikami symulacji przeprowadzonych w programie MathCad.

#### 4.4.2.1. Kąt fazowy badanej impedancji

Błąd spowodowany niedopasowaniem argumentu obciążenia pomiarowego i mierzonej impedancji jest równy zero – tak samo jak w przypadku metody z przesunięciem  $\psi$ . Wynika to z istoty metody wektorowej, w której wyznaczenie impedancji pętli opiera się o pomiar składowych ortogonalnych fazorów napięć, czyli wyznaczenie wartości impedancji pętli odbywa się zgodnie z zależnością (3.5).

#### 4.4.2.2. Tolerancja wykonania rezystora obciążenia pomiarowego

Analizę wpływu tolerancji wykonania rezystora obciążenia pomiarowego  $R_0$  na dokładność wyznaczenia impedancji pętli przeprowadzono, przyjmując (tak samo jak dla miernika działającego zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$ ) wartość rezystora obciążenia pomiarowego  $R_0$  równą  $10 \Omega$  przy klasach dokładności 0,01, 0,05, 0,1%.

Podobnie jak w przypadku miernika działającego zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$ , tolerancja tego rezystora obciążenia pomiarowego  $\Delta R_0 = 0,001, 0,005, 0,01 \Omega$  przekłada się odpowiednio na 0,01, 0,05, 0,1% błędów wyznaczenia impedancji pętli.

## 4.4.2.3. Błąd pomiaru napięcia

Istotny wpływ na dokładność pomiaru impedancji pętli miernikiem działającym zgodnie z metodą wektorową ma błąd pomiaru napięcia  $\Delta E_w$ . Na błąd  $\Delta E_w$  składają się następujące czynniki:

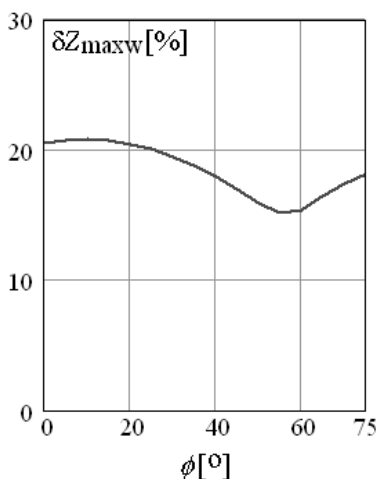
- dokładność przetwarzania napięcia przez przetwornik  $\Delta E_{\text{przetw}}$ ,
- błąd konwersji a/c sygnału pomiarowego  $\Delta E_{\text{DAQ}}$ .

Szczegółowa charakterystyka tych błędów została przedstawiona w rozdziale 4.3.2.3.

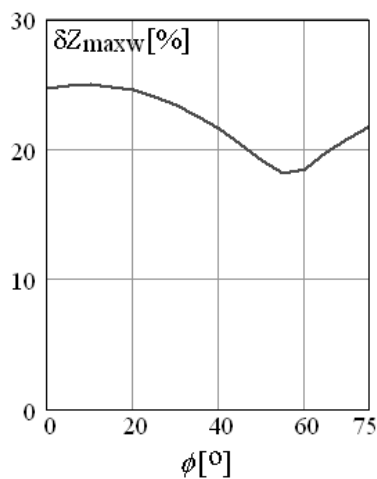
Całkowity graniczny błąd pomiaru napięcia, przeliczony do wejścia układu, dla każdej z czterech próbek napięcia  $\Delta E_b = \Delta E_c = \Delta U_b = \Delta U_c = \Delta E_w$  można wyznaczyć poprzez analogię do zależności (4.42), czyli:

$$\Delta E_w = \left| \Delta E_{\text{przetw}} \right| + \left| k_u \Delta E_{\text{DAQ}} \right| \quad (4.68)$$

Wstępnie do analizy przyjęto dane tych samych przetworników napięcia co w rozdziale 4.3.2.3 (tab. 4.3) wraz z kartą pomiarową 6024E. Okazało się, że błąd pomiaru napięcia  $\Delta E_w$  dla przetworników: LV25-P i LV-20-P dyskwalifikuje je do zastosowania w układzie miernika impedancji pętli ze względu na wprowadzenie zbyt dużego błędu pomiaru impedancji pętli, który przekracza 20% (rys. 4.37 i 4.38).

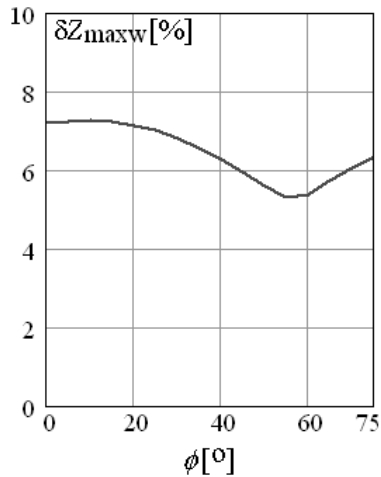


Rys. 4.37. Błąd  $\delta Z_{\max w} = f(\phi)$ ,  $Z/R_0 = 0,1$  gdy w układzie miernika występuje przetwornik LEM LV25-P



Rys. 4.38. Błąd  $\delta Z_{\max w} = f(\phi)$ ,  $Z/R_0 = 0,1$  gdy w układzie miernika występuje przetwornik LEM LV20-P

Dlatego też poddano analizie przetwornik LEM CV-500, którego błąd pomiaru napięcia  $\Delta E_w$  wraz z kartą pomiarową 6024E nie przekroczył 0,8 V (patrz rozdział 4.3.2.3.). Wówczas niedokładność pomiaru impedancji metodą wektorową nie powinna przekraczać 7,3% (rys. 4.39).



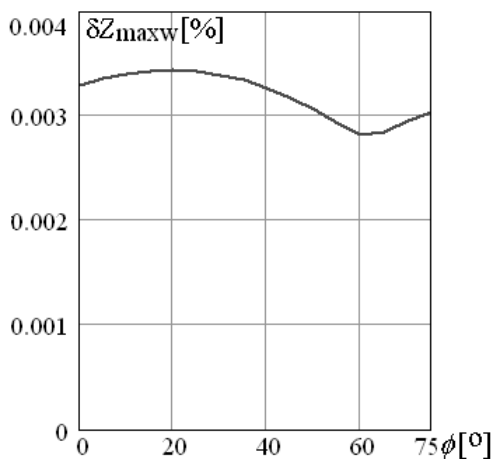
Rys. 4.39. Błąd  $\delta Z_{\max w} = f(\phi)$  dla danych:  $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\Delta E_b = \Delta E_c = \Delta U_b = \Delta U_c = 0,8V$

#### 4.4.2.4. Dokładność 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, zależą od błędu pomiaru okresu napięcia sieci  $\Delta T$ , czasu próbkowania  $T_p$  oraz położenia danej próbki, zgodnie z zależnością:

$$\Delta t_l = \frac{i_l}{N} \Delta T + T_p, \quad (4.69)$$

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



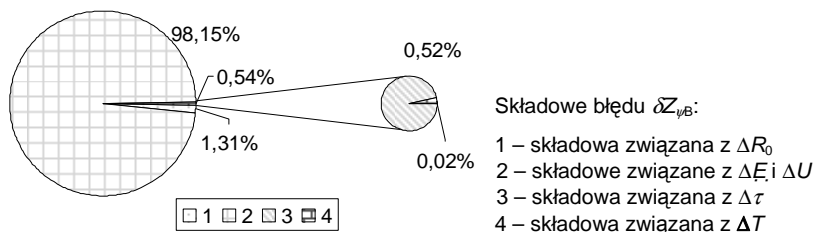
Rys. 4.40. Błąd  $\delta Z_{\max w} = f(\phi)$  dla danych  $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 10 \Omega$ ,  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t_4 = 0,5 \mu s$

Z zależności (4.69) wynika, że błąd wyznaczenia położenia próbek wrasta liniowo wraz ze wzrostem odległości od pierwszej próbki. Przyjmując, że  $T_p = 0,5 \mu\text{s}$ ,  $N = 20000$  (na okres przypada 200 próbek),  $\Delta T = 0,3 \mu\text{s}$  (zgodnie z wynikiem analiz przeprowadzonych w rozdziale 4.3.2.4.),  $t_1 = 20T_p$ ,  $t_2 = 70T_p$ ,  $t_3 = 1220T_p$ ,  $t_4 = 1270 T_p$ , wówczas  $\Delta t_1 = 0,5 \mu\text{s}$ ,  $\Delta t_2 = 0,5 \mu\text{s}$ ,  $\Delta t_3 = 0,5002 \mu\text{s}$ ,  $\Delta t_4 = 0,5002 \mu\text{s}$ , co przekłada się na błąd pomiaru impedancji pętli rzędu 0,004% (rys. 4.40).

## 4.5. Podsumowanie przeprowadzonych analiz metrologicznych

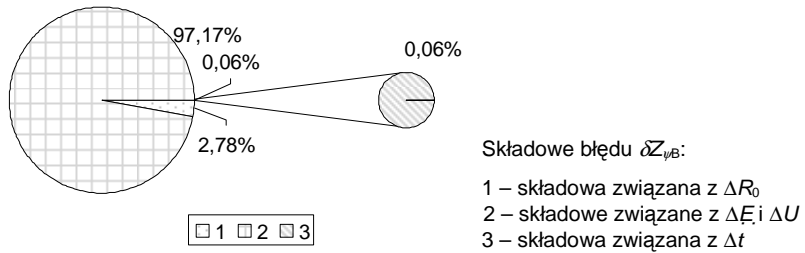
Przeprowadzona w rozdziale 4. analiza wrażliwości dwóch metod pomiaru impedancji pętli: metody z przesunięciem  $\psi$  i metody wektorowej pozwala sformułować następujące wnioski:

1. W obu metodach nie występuje błąd fazowy – co jest ich niewątpliwą zaletą,
2. Obie metody reagują podobnie na występujące obciążenia robocze sieci.
3. Na odkształcenia krzywej napięcia bardziej wrażliwa jest metoda wektorowa. Błąd pomiaru impedancji  $\delta Z_{\text{odksz}}$ , gdy odkształcenie napięcia jest na poziomie dopuszczalnym przez normy (THD = 8%), nie przekracza 0,1% dla metody z przesunięciem  $\psi$ , natomiast dla metody wektorowej może znacznie przekraczać dopuszczalne 30%. Konieczne jest zatem wyznaczanie wartości impedancji jako wartości średniej z impedancji obliczonych za okres, wówczas błąd spowodowanym odkształceniem mierzonej krzywej nie przekroczy 2% (dla danych przyjętych jak na rysunku 4.32).
4. Całkowity błąd  $\delta Z_A$  wynikający z charakteru obwodu badanego przy założeniu następujących danych:  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z = 1 \Omega$ ,  $\phi = 75^\circ$ ,  $R_0 = 4 \Omega$ , krzywa napięcia odkształcona tak jak na rys. 4.8, obciążenie robocze  $Z_S = 1000 \Omega$  i  $\phi_S = 75^\circ$  oraz że źródła błędów nie są ze sobą skorelowane zgodnie z zależnością (4.20), wynosi:
  - dla pomiaru dokonywanego metodą z przesunięciem  $\delta Z_{\psi A}$  jest rzędu 0,15%,
  - dla metody wektorowej  $\delta Z_{wA}$  rzędu 3,1%.
5. W trakcie projektowania i realizacji konstrukcji miernika należy szczególnie zadbać o to, aby błąd pomiaru napięcia był jak najmniejszy. W każdej z tych dwóch metod błąd pomiaru napięcia istotnie wpływa na całkowity błąd pomiaru impedancji (rys. 4.41 i 4.42).



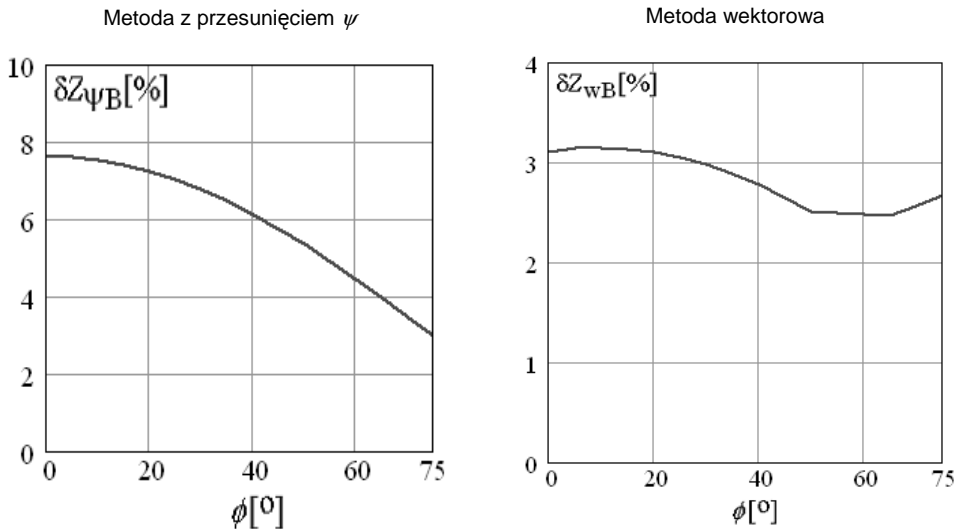
Rys. 4.41. Szacunek udziałów poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji pętli zwarciowej  $\delta Z_{\psi B}$ , realizowanego zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$ , dla przyjętych parametrów:

$$E_z = 230 \text{ V}, \quad Z = 1 \Omega, \quad R_0 = 4 \Omega, \quad \Delta R_0 = 4 \text{ m}\Omega, \quad \Delta E_\psi = \Delta U_\psi = 1,54 \text{ V}, \quad \Delta \tau = \Delta T = 0,3 \mu\text{s}$$



Rys. 4.42. Szacunek udziałów poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji pętli zwarciowej  $\delta Z_{wB}$ , realizowanego zgodnie z metodą wektorową dla przyjętych parametrów:  
 $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 4 \Omega$ ,  $\Delta R_0 = 4 \text{ m}\Omega$ ,  $\Delta E_w = \Delta U_w = 0,8 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 0,5 \mu\text{s}$

6. Rezystor obciążenia pomiarowego powinien być wykonany z tolerancją maksymalnie  $\pm 0,1\%$ . W mierniku działającym zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$  istotny jest również dokładny pomiar przesunięcia  $\tau$  między napięciami.
7. Błąd pomiaru impedancji pętli  $\delta Z_B$  wynikający z parametrów miernika (dla danych przyjętych w rozdziale 4) w przypadku metody z przesunięciem  $\psi$  nie przekracza  $7,6\%$ , a dla metody wektorowej  $\delta Z_{wB}$  i  $3,2\%$  (rys. 4.43).



Rys. 4.43. Błąd  $\delta Z_B = f(\phi)$  dla danych:  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 4 \Omega$ ,  $\Delta E_\psi = \Delta U_\psi = 1,54 \text{ V}$ ,  $\Delta E_w = 0,8 \text{ V}$ ,  $\Delta R_0 = 4 \text{ m}\Omega$ ,  $\Delta \tau = 0,3 \mu\text{s}$ ,  $\Delta T = 0,3 \mu\text{s}$ ,  $\Delta t = 0,5 \mu\text{s}$

8. Całkowity błąd pomiaru impedancji pętli zwarciowej  $\delta Z_C$  wyznaczony na podstawie błędów cząstkowych  $\delta Z_A$  i  $\delta Z_B$  oszacowanych w punkcie 4 i 7 wynosi: dla miernika działającego zgodnie z metodą z przesunięciem  $\delta Z_{wC} = 7,8\%$ , natomiast dla miernika działającego w oparciu o metodę wektorową –  $\delta Z_{wC} = 4,75\%$ .

9. Na podstawie przeprowadzonych analiz właściwości metrologicznych metody z przesunięciem  $\psi$  i metody wektorowej można sprecyzować zasadę wyboru metody w zależności od parametrów sieci zasilającej. W przypadku pomiaru impedancji pętli w punkcie pomiarowym, w którym występują silne odkształcenia krzywej napięcia, lepszą (bardziej dokładną) okaże się metoda z przesunięciem  $\psi$ . Jeśli natomiast krzywa napięcia w miejscu pomiaru jest silnie odkształcona wówczas pomiar będzie dokładniejszy, gdy zostanie wykonany odmianą metody wektorowej opracowaną przez R. Roskosza [56]. Innym sposobem na ograniczenie błędu pomiaru impedancji pętli metodą wektorową, wynikającego z odkształcenia krzywej napięcia, jest zastosowanie wejściowych układów filtrujących w praktycznej realizacji układu miernika. Dzięki czemu zostaną odfiltrowane wszystkie harmoniczne oprócz podstawowej i znacznie zmniejszy się błąd pomiaru impedancji  $\delta Z_{\text{odksz}}$  metodą wektorową, a tym samym znacznie zwiększy się klasa miernika.
10. Na obciążenia robocze obie metody reagują podobnie.



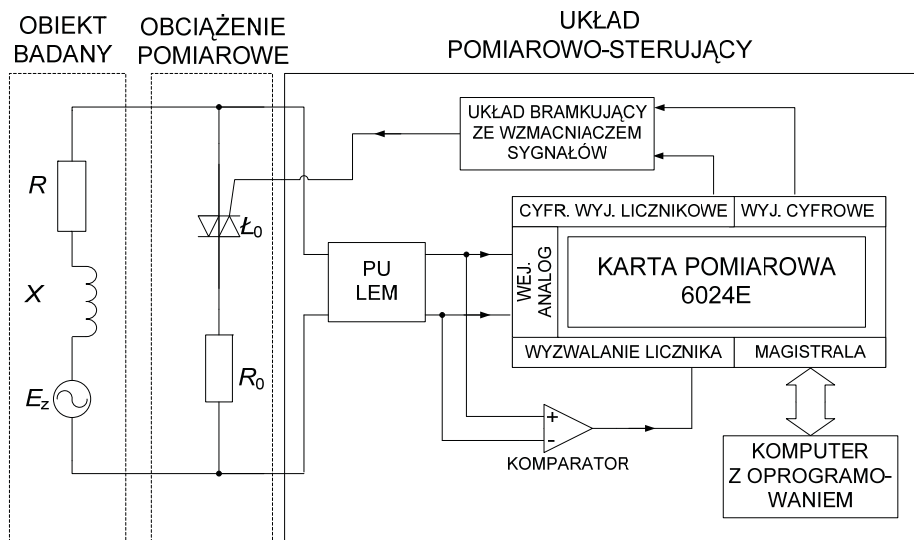
## Rozdział 5

# FIZYCZNY MODEL MIERNIKA IMPEDANCJI PĘTLI

W celu sprawdzenia zbieżności rozważań teoretycznych, zaprezentowanych w poprzednim rozdziale, dotyczących dokładności pomiaru impedancji pętli metodą z przesunięciem  $\psi$  oraz metodą wektorową, został zbudowany i przebadany model miernika realizujący pomiar impedancji zwarciowej pętli zarówno metodą z przesunięciem  $\psi$ , jak i metodą wektorową. Wyniki tych badań zostały zaprezentowane w rozdziale 5.

### 5.1. Struktura modelu miernika i obiektu badanego

Schemat blokowy zaprojektowanego miernika impedancji pętli działającego zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$  i metodą wektorową został przedstawiony na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Schemat blokowy układu miernika impedancji pętli realizującego metodę z przesunięciem  $\psi$  oraz metodę wektorową

#### 5.1.1. Obiekt badany

Przyjęto, że obiekt badany składa się z szeregowego połączenia źródła napięcia przemiennego  $E_z$  oraz liniowej rezystancji  $R$  i reaktancji  $X$ , czyli impedancji pętli  $Z$ .

Role źródła napięcia w układzie pełnił generator napięcia firmy Agilent typu 6813B o amplitudzie  $E_z = 230$  V i częstotliwości  $f = 50$  Hz. Natomiast badaną impedancję stanowił impedor o module  $Z = 10$   $\Omega$  i nastawianym argumentem  $\phi = 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75^\circ$ .

### 5.1.2. Obciążenie pomiarowe

Człon obciążenia pomiarowego zawiera szeregowe połączenie rezystora obciążenia pomiarowego  $R_0$  oraz łącznika tyrystorowego  $L_0$ . Rolą tego członu jest wywoływanie krótkotrwałego sztucznego zwarcia.

Jako obciążenie pomiarowe  $R_0$  zastosowano typowy rezystor, wykonany z drutu manganinowego o rezystancji  $R_0 = 38,3 \Omega$  i błędzie 0,1%. Dopuszczalny prąd obciążenia tego rezystora wynosi  $I = 4 \text{ A}$ .

W układzie miernika impedancji pętli jako łącznik tyrystorowy zastosowano triak BTA16600B.

### 5.1.3. Układ pomiarowo-sterujący

Układ pomiarowo-sterujący składa się z:

- przetwornika napięcia PU – obniżającego napięcie sieciowe do poziomu wejściowego karty pomiarowej,
- karty pomiarowej – mającej na celu akwizycję napięcia przed i po załączeniu obciążenia pomiarowego  $R_0$  oraz sterowanie pracą łącznika  $L_0$ ,
- oprogramowania, które jest integralną częścią miernika. Za pomocą oprogramowania ustawiane są parametry konfiguracyjne karty pomiarowej, wyznaczane wartości napięć oraz jest obliczana i wyświetlana wartość zmierzonej impedancji (jak również jej składowe, rezystancja i reaktancja).

Zaletą tego układu jest to, że jest on sprzętowo jednolity niezależnie od tego, którą z tych dwóch metod wyznaczana się wartość impedancji pętli. Różne natomiast są aplikacje programowe.

Na podstawie wyników analizy przeprowadzonej w rozdziale 4, przyjęto, że rolę przetwornika napięciowego PU w tym układzie pełni LEM typu CV-500.

W modelu miernika zastosowano kartę pomiarową firmy National Instruments typu 6024E. Dokładność pomiaru napięcia tą kartą pomiarową przy napięciu wejściowym  $\pm 5 \text{ V}$  wynosi  $\Delta E_{\text{DAQ}} = 7 \text{ mV}$ .

Oprogramowanie miernika impedancji pętli zwarciowej zostało zaprojektowane i wykonane w środowisku firmy National Instruments – LabVIEW wersja 7.0.

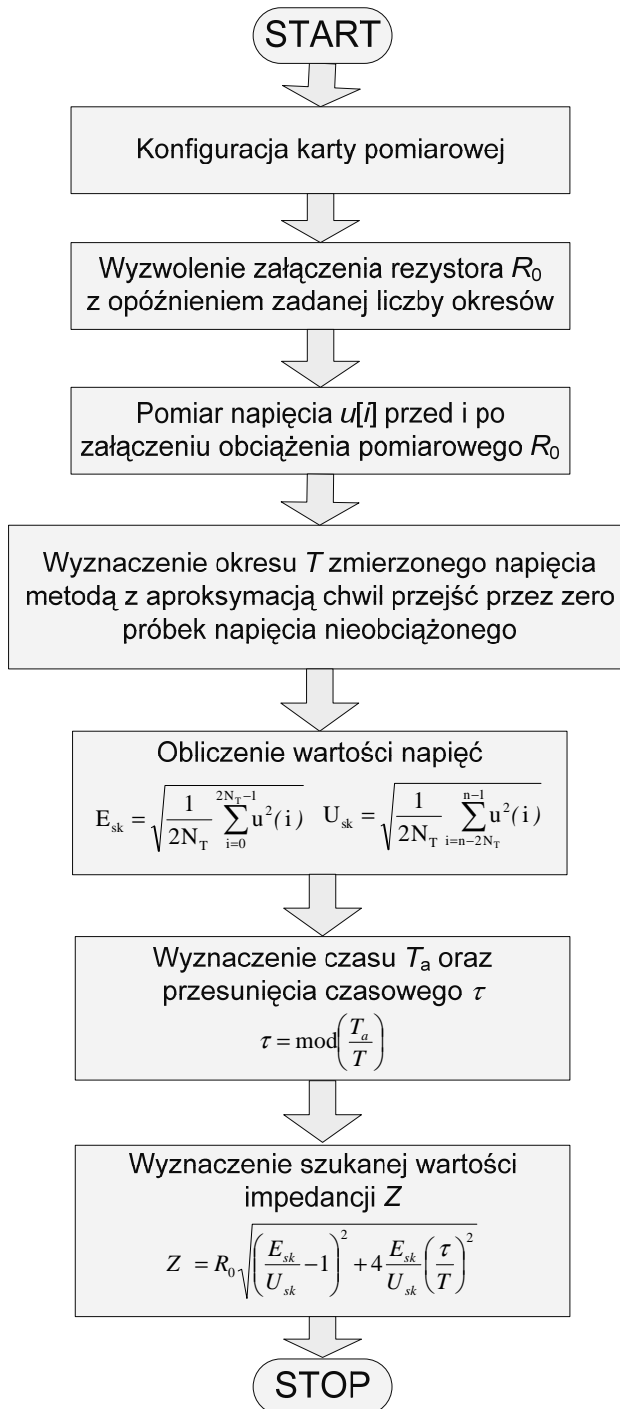
Algorytm działania programu w przypadku pomiaru impedancji pętli metodą z przesunięciem  $\psi$  przedstawia rys. 5.2 [12].

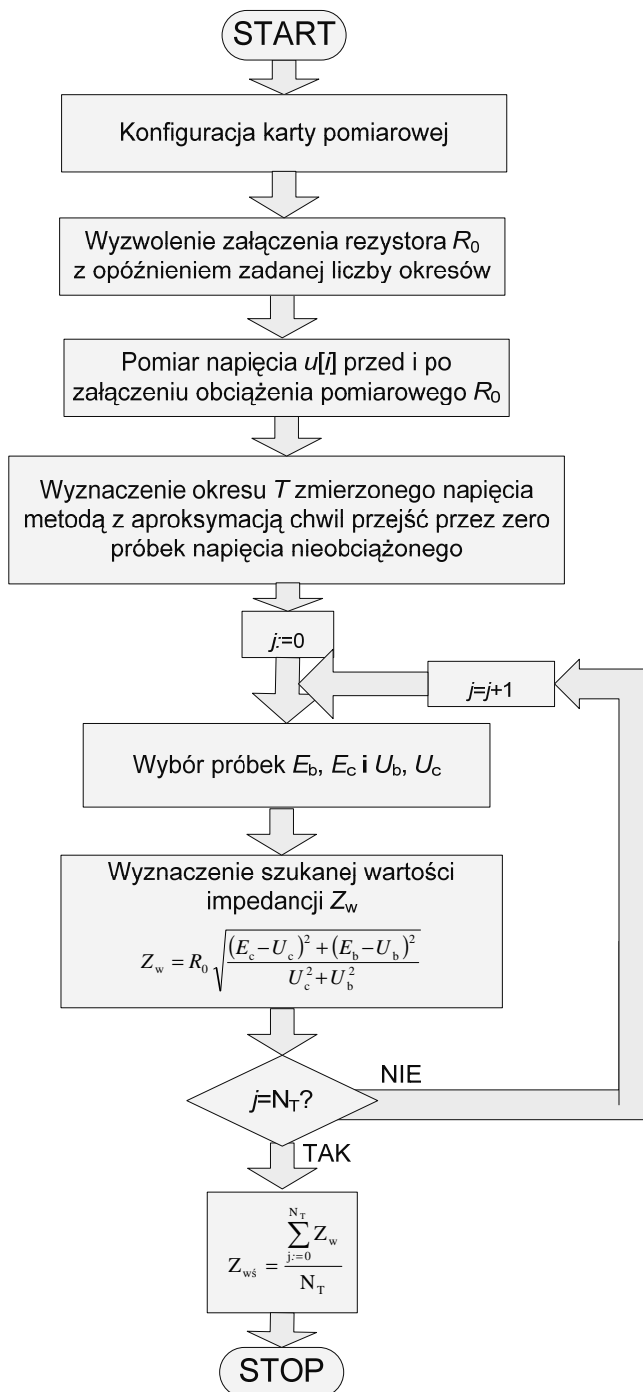
Algorytm programu w przypadku pomiaru impedancji pętli miernikiem działającym zgodnie z metodą wektorową (rys. 5.3) w pierwszych czterech krokach jest identyczny, jak w przypadku mierników działających zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$ .

W piątym kroku następuje  $j$ -krotne wyznaczenie wartości odpowiednich napięć przed  $E_b$ ,  $E_c$  i napięć  $U_b$ ,  $U_c$  po załączeniu obciążenia pomiarowego  $R_0$ , na podstawie których obliczana jest średnia wartość szukanej wartości impedancji  $Z_{\text{ws}}$ .

W celu zwiększenia dokładności pomiaru impedancji pętli przewidziano możliwość nieuwzględnienia wyników pomiarów wykonanych na przykład w czasie zapadu napięcia.

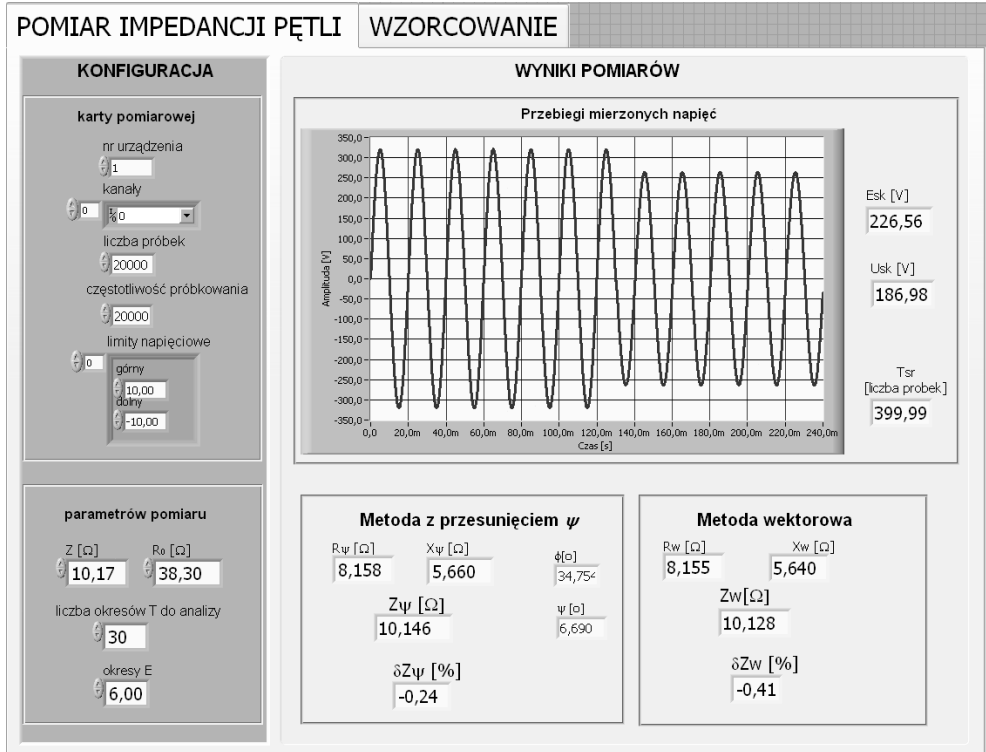
Przed obliczeniem wartości średniej z impedancji  $Z_{\text{ws}}$  dla chwilowych napięć, program sprawdza, czy każda z obliczonych wartości impedancji nie odbiega od reszty z założoną tolerancją. Jeśli tak jest, to wartość impedancji nie jest uwzględniana podczas obliczania wartości średniej impedancji.

Rys. 5.2. Algorytm programu do pomiaru impedancji pętli zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$



Rys. 5.3. Algorytm programu do pomiaru impedancji miernikiem działającym w oparciu o metodę wektorową

Panel zaprojektowanego programu przedstawiono na rysunku 5.4. Użytkownik ma możliwość dokonania ustawień konfiguracyjnych karty pomiarowej, parametrów akwizycji sygnału pomiarowego oraz wartości rezystancji obciążenia pomiarowego  $R_0$ , liczby okresów,  $T$ , na podstawie których wyznaczane jest  $T_{sr}$ , zadawania liczby okresów napięcia  $E$  oraz wartości rzeczywistej impedancji  $Z$  – w warunkach laboratoryjnych, w celu oszacowania błędów miernika.



Rys. 5.4. Panel programu do pomiaru impedancji pętli. Wyniki dla sinusoidalnej krzywej napięcia i danych  $E_z = 230$  V,  $Z = 10,17$   $\Omega$ ,  $R_0 = 38,3$   $\Omega$ ,  $\phi = 35^\circ$

Wyniki pomiarów impedancji pętli obiema metodami przedstawione są na jednym panelu tak, aby łatwiej można było porównać wyniki.

## 5.2. Badania eksperymentalne modelu miernika impedancji pętli

W celu sprawdzenia właściwości metrologicznych fizycznego modelu miernika impedancji pętli zwarciowej przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych. Większość z nich dotyczyła weryfikacji wyników badań symulacyjnych zaprezentowanych w rozdziale 4.

- Badania fizycznego modelu miernika zostały przeprowadzone zgodnie z założeniami:
- obwód badany ma strukturę taką, jak na rys. 3.1 oraz że w badanym obwodzie nie występują odchylenia i wahania napięcia oraz brakuje obciążeń roboczych,
  - rolę źródła napięcia pełni generator (przebiegu sinusoidalnego lub napięcia zniekształconego) firmy Agilent typu 6813B o amplitudzie  $E_z = 230$  V i częstotliwości  $f = 50$  Hz,

- badaną impedancję stanowi impedor o module  $Z = 10,17 \Omega$  i argumentie  $\phi$  nastawianym w następującym zakresie 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75°,
- obciążenie pomiarowe stanowi liniowy rezystor  $R_0$ ,
- wprowadzone opóźnienie  $k = T$  między napięciami eliminuje stan przejściowy wywołany komutacją łącznika  $L_0$ ,
- $N = 20000$ ,  $T_p = 0,5 \mu s$ , dla metody wektorowej  $t_1 = 20T_p$ .

Przed przystąpieniem do pomiarów dokonano kalibracji zbudowanego układu miernika. Zasilono obwód z generatora napięciem sinusoidalnym o amplitudzie 230V i częstotliwości  $f = 50$  Hz. Kalibrację przeprowadzono, włączając jako impedancję źródła kolejne rezystancje (trzy rezystory normalne, każdy o rezystancji  $R_N = 10,0134 \Omega$  połączone w różnych konfiguracjach) równe 5,0067  $\Omega$ , 10,0134  $\Omega$ , 20,0268  $\Omega$  i 30,0406  $\Omega$ . Obciążenie pomiarowe stanowił rezystor  $R_0 = 38,3 \Omega$  o dopuszczalnym prądzie  $I = 4$  A i błędzie 0,1%.

Pomiary te wykazały występowanie w samym układzie błędu multiplikatywnego i addytywnego. Błędy te odpowiednio wynoszą: dla metody z przesunięciem  $\psi$  1,0107 i -0,325, a dla metody wektorowej 1,0117 i -0,3289. Wobec czego oba błędy zostały uwzględnione w oprogramowaniu miernika i wynik pomiaru impedancji jest odpowiednio korygowany.

Dokonano sprawdzenia dokładności pomiaru po uwzględnieniu korekcji, włączając w obwód jako impedancję wewnętrzną źródła jeden z rezystorów wzorcowych. Błąd pomiaru w tym wypadku, niezależnie od metody działania miernika (czy jest to metoda z przesunięciem  $\psi$  czy też wektorowa) nie przekracza 0,1%.

Pomiary impedancji pętli zbudowanym miernikiem przeprowadzono dla różnych wartości rezystancji obciążenia pomiarowego. W książce przedstawiono wyniki otrzymane dla  $R_0 = 38,3 \Omega$  o dopuszczalnym prądzie  $I = 4$  A i błędzie 0,1%, przy sinusoidalnej i odkształconej krzywej napięcia.

Za pomocą generatora Agilent typu 6813B nastawiono odkształcenie krzywej napięcia o współczynniku THD = 8% (zgodnie z przepisami [42]), uzyskując amplitudy poszczególnych harmonicznich zestawione w tab. 5.1.

W generatorze tym istnieje możliwość zadawania odkształcenia napięcia jednie przez zadanie współczynnika zniekształceń THD (nie ma możliwości wprowadzania amplitud poszczególnych harmonicznich ani kątów przesunięcia, lecz istnieje możliwość ich odczytu).

**Tablica 5.1**

Wartość amplitud poszczególnych nieparzystych harmonicznich od 3 do 13 dla napięcia 230V o THD = 8% wygenerowanych przez przyrząd Agilent typu 6813B

L.p.	Numer harmonicznej	Wartość napięcia [V]	$a_n$
1.	3	16,41	0,07
2.	5	7,81	0,03
3.	7	0,95	0,0004
4.	9	1,86	0,008
5.	11	1,31	0,006
6.	13	0,19	0,0008

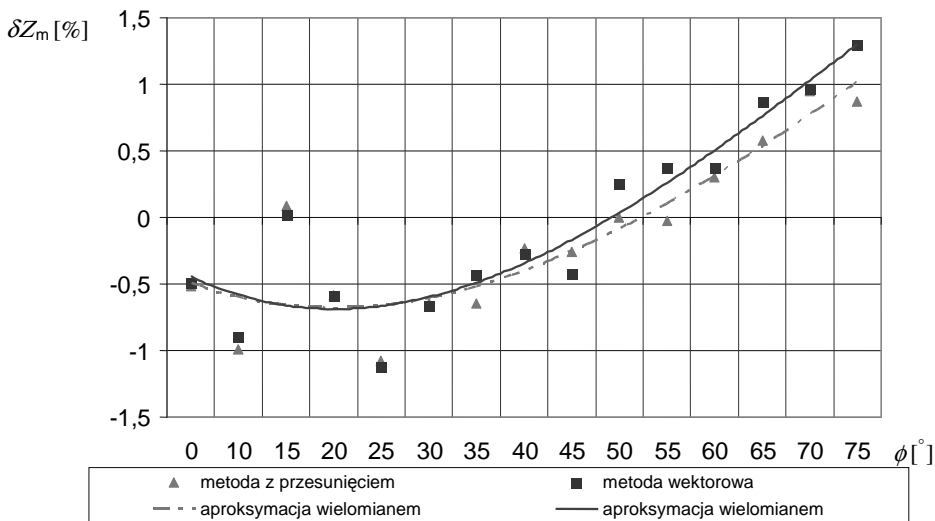
Na podstawie pomiarów impedancji pętli zwarciowej przeprowadzonych dwiema metodami oszacowano ich błędy jako różnicę pomiędzy wskazaniem przyrządu  $Z_{\psi m}$  i  $Z_{wm}$ , a znaną wartością badanej impedancji  $Z$ . Dla metody z przesunięciem  $\psi$  błąd określa zależność:

$$\delta Z_{\psi m} = \frac{Z_{\psi m} - Z}{Z} 100\% , \quad (5.1)$$

a dla metody wektorowej następujący wzór:

$$\delta Z_{wm} = \frac{Z_{wm} - Z}{Z} 100\% . \quad (5.2)$$

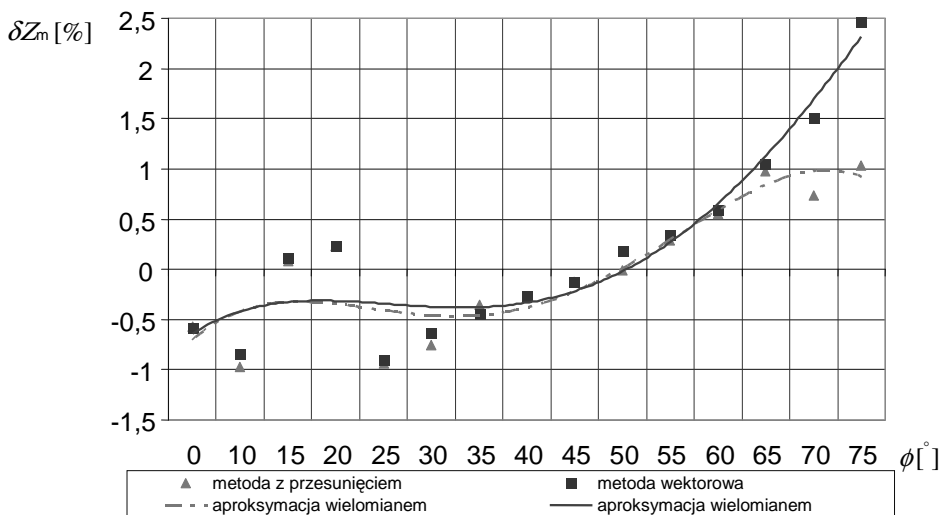
Przeprowadzono badania i otrzymano wyniki pomiarów, dla przypadku, gdy krzywa napięcia jest sinusoidą, obciążenie pomiarowe  $R_0$  jest równe  $38,3 \Omega$ , a rolą badanej impedancji stanowi impedor o module  $Z = 10,17 \Omega$ . Na rysunku 5.5. przedstawiono błąd pomiaru impedancji pętli zwarciowej (po uwzględnieniu korekcji)  $\delta Z_m$  w funkcji argumentu impedancji pętli  $\phi$ , otrzymany dla miernika działającego zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$  oraz z metodą wektorową.



Rys. 5.5. Błąd  $\delta Z_m = f(\phi)$  dla sinusoidalnej krzywej napięcia i danych:  
 $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z = 10,17 \Omega$ ,  $R_0 = 38,3 \Omega$

Rozrzut błędu pomiaru impedancji  $\delta Z_m$  dla metody z przesunięciem  $\psi$  zawiera się w przedziale od  $-1,08\%$  do  $0,95\%$ , natomiast dla metody wektorowej  $\delta Z_{wm}$  przyjmuje wartości od  $-1,12\%$  do  $+1,3\%$ .

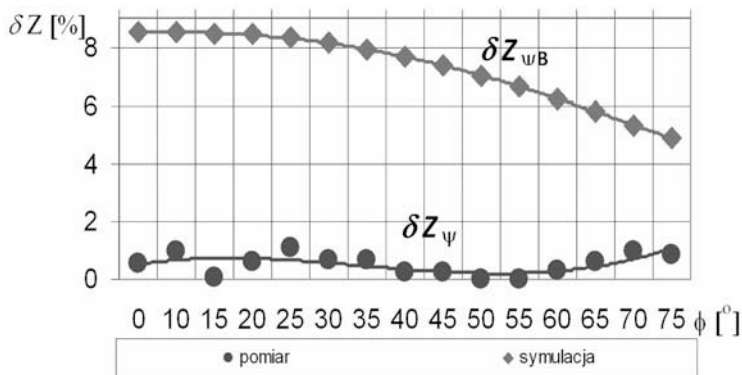
W przypadku, gdy mierzona krzywa jest odkształcona (THD = 8%), błąd pomiaru impedancji pętli  $\delta Z_{wm}$  dla metody wektorowej zawiera się w przedziale od  $-0,63\%$  do  $2,5\%$  (rys. 5.6), a dla metody z przesunięciem błąd  $\delta Z_{\psi m}$  wynosi od  $-0,97\%$  do  $-1,03\%$ . Wyniki eksperymentalne potwierdzają wyniki symulacji komputerowych przeprowadzone w rozdz. 4, które wykazały, iż bardziej wrażliwa na odkształcenia napięcia jest metoda wektorowa.



Rys. 5.6. Błąd  $\delta Z_m = f(\phi)$  dla odkształconej krzywej napięcia (THD = 8%) i danych:  
 $E_z = 230$  V,  $Z = 10,17$   $\Omega$ ,  $R_0 = 38,3$   $\Omega$

W celu weryfikacji wyników analiz symulacyjnych przeprowadzonych w rozdz. 4. z eksperymentalnymi, porównano błąd  $\delta Z_B$  wynikający z parametrów miernika i metody pomiaru z bezwzględną wartością błędu  $|\delta Z_m|$ .

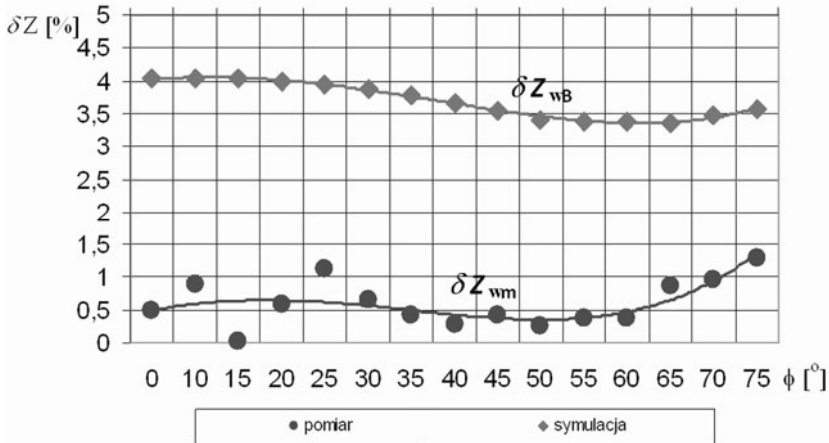
Na rysunku 5.7 przedstawiono wykresy błędów  $\delta Z_{\psi B}$  i  $|\delta Z_{\psi m}|$  w funkcji argumentu pętli zwarcia, dla przypadku, gdy miernik impedancji pętli działa w oparciu o metodę z przesunięciem  $\psi$ . Jak widać z tego rysunku, krzywa błędu  $|\delta Z_{\psi m}| = f(\phi)$  pomiaru impedancji pętli wyznaczonego na podstawie eksperymentu leży w obszarze ograniczonym przebiegiem błędu granicznego  $\delta Z_{\psi B} = f(\phi)$  wyznaczonego symulacyjnie dla danych warunków pomiaru. Na tej podstawie stwierdza się zbieżność wyników eksperymentalnych z symulacyjnymi dla metody z przesunięciem  $\psi$ .



Rys. 5.7. Błędy  $|\delta Z_{\psi m}|$  i  $\delta Z_{\psi B} = f(\phi)$  dla sinusoidalnej krzywej napięcia i danych:  $E_z = 230$  V,  
 $Z = 10,17$   $\Omega$ ,  $R_0 = 38,3$   $\Omega$ ,  $\Delta E_{\psi} = \Delta U_{\psi} = 1,54$  V,  $\Delta R_0 = 0,04$   $\Omega$ ,  $\Delta \tau = 0,3$   $\mu$ s,  $\Delta T = 0,3$   $\mu$ s.



Na rysunku 5.8 zaprezentowano wykresy błędów  $\delta Z_{wB}$  i  $|\delta Z_{wm}|$  w funkcji argumentu pętli zwarcia  $\phi$ , dla przypadku, gdy miernik impedancji pętli działa zgodnie z metodą wektorową.



Rys. 5.8. Błędy  $|\delta Z_{wm}|$  i  $\delta Z_{wB}=f(\phi)$  dla sinusoidalnej krzywej napięcia i danych:  $E_z = 230$  V,  $Z = 10,17$   $\Omega$ ,  $R_0 = 38,3$   $\Omega$ ,  $\Delta E_w = \Delta U_w = 0,8$  V,  $\Delta R_0 = 0,04$   $\Omega$ ,  $\Delta t = 0,5$   $\mu$ s

W tym wypadku krzywa błędu  $|\delta Z_{wm}| = f(\phi)$  pomiaru impedancji pętli wyznaczonego na podstawie eksperymentu znajduje się w obszarze ograniczonym funkcją błędu granicznego  $\delta Z_{wB} = f(\phi)$  wyznaczonego symulacyjnie dla danych warunków pomiaru. Co daje podstawy do stwierdzenia, iż uzyskano zbieżność wyników eksperymentalnych z symulacyjnymi dla metody wektorowej.

### 5.3. Podsumowanie badań doświadczalnych miernika

Przeprowadzone badania eksperymentalne miernika do pomiaru impedancji pętli pozwalają wysnuć następujące wnioski:

- metoda wektorowa jest bardziej wrażliwa na odkształcenia napięcia niż metoda z przesunięciem  $\psi$ . Wyniki pomiarów eksperymentalnych nie są tak jednoznaczne, jak wyniki badań symulacyjnych, z tego powodu, że oprogramowanie miernika impedancji pętli działającego zgodnie z metodą wektorową zostało zaprojektowane tak, że wartość impedancji pętli wyznaczana jest jako wartość średnia za okres impedancji. Innym sposobem na znaczne ograniczenie błędu pomiaru impedancji pętli (wynikającego z odkształcenia krzywej napięcia) jest zastosowanie wejściowych układów filtrujących w praktycznej realizacji układu miernika działającego zgodnie z metodą z wektorową. Pozwoli to na odfiltrowanie składowych harmonicznych w mierzonym przebiegu, a tym samym znacznie zwiększy dokładność pomiaru impedancji pętli metodą wektorową.
- uzyskano zbieżność wyników otrzymanych z symulacji komputerowych oraz eksperymentalnych, bowiem, zarówno gdy pomiar impedancji pętli dokonywany jest zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$ , jak i metodą wektorową, funkcja błędu  $|\delta Z_{wm}| = f(\phi)$  pomiaru impedancji pętli wyznaczonego na podstawie eksperymentu znajduje się

w obszarze ograniczonym funkcją błędu granicznego  $\delta Z_{wB} = f(\phi)$  wyznaczonego symulacyjnie dla danych warunków pomiaru;

- błąd pomiaru  $\delta Z_m$  impedancji pętli zbudowanym i przedstawionym w rozdziale 5. miernikiem, w przypadku gdy mierzona impedancja pętli ma charakter rezystancyjny (niezależnie od metody, zgodnie z którą działa miernik, czy jest to metoda z przesunięciem  $\psi$  czy też wektorowa) dla danych:  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R = 10,0134 \Omega$ ,  $R_0 = 38,3 \Omega$ , nie przekracza 0,1%. Natomiast, gdy mierzona jest impedancja pętli  $Z = 10,17 \Omega$  wówczas błąd pomiaru  $\delta Z_m$  nie przekracza 3%, gdy napięcie jest odkształcone (dla THD = 8%) i nie przekracza 1,5%, gdy ma przebieg sinusoidalny.
- w celu uzyskania przyrządu pomiarowego lepszej klasy zamiast zastosowanego przetwornika napięcia CV-500 (klasy 0,2) można by zastosować rezystancyjne dzielniki napięcia (kl. 0,02), co powinno zmniejszyć całkowity błąd pomiaru impedancji pętli takim przyrządem.

## Rozdział 6

# UKŁAD DO WZORCOWANIA MIERNIKÓW IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ

Problematyka wzorcowania mierników impedancji pętli (MIP) jest istotna, głównie ze względu na to, że na podstawie pomiaru wartości impedancji ocenia się skuteczność ochrony przeciwporażeniowej.

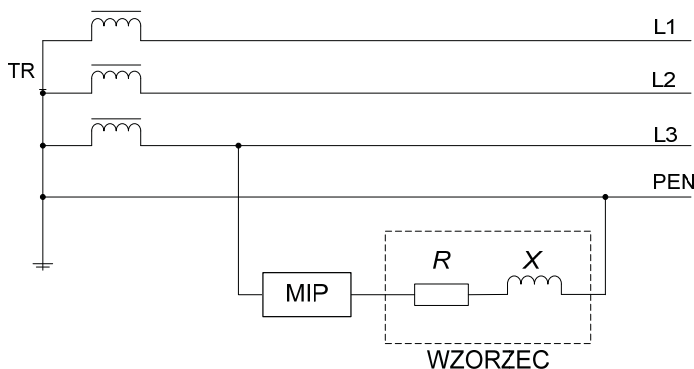
Sposób sprawdzania i kalibracji mierników impedancji pętli zwarciowej opisany w rozdziale 6.4 jest poprawny tylko w warunkach, w których impedancja źródła jest równa zeru (jak w przypadku zasilania z generatora Agilent typu 6813B). W większości przypadków jednakże impedancja źródła nie jest znana i ma wartość większą od zera. Należy wtedy wykorzystać taki układ, w którym eliminowany jest wpływ impedancji wewnętrznej źródła na dokładność wzorcowania.

W rozdziale tym dokonano na podstawie literatury przeglądu znanych i stosowanych układów do wzorcowania [9–11, 40, 46, 60, 64] mierników impedancji pętli. Większość stosowanych metod do wzorcowania MIP nie uwzględnia impedancji źródła zasilania, w związku z czym wzorcowanie obciążone jest dodatkowym błędem.

Autorka proponuje, aby mierniki impedancji pętli działające w oparciu o metodę z przesunięciem  $\psi$  i metodę wektorową wzorcować w nowym układzie [59], opartym na metodzie J. Sawickiego [60]. Zastosowana metoda do wzorcowania została poddana analizie wrażliwości, a następnie zaimplementowana jako fizyczny układ do wzorcowania.

### 6.1. Znane układy do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej

Najpowszechniej stosowanym układem do sprawdzania mierników impedancji (zalecanym przez przepisy [11]) jest układ przedstawiony na rysunku 6.1.



Rys. 6.1. Układ do sprawdzania mierników impedancji pętli zalecany przez przepisy [11]

Układ jest zasilany z transformatora o mocy nie mniejszej niż 400kVA, napięciu fazowym  $230\text{ V} \pm 23\text{ V}$ , przekładni 1:1, przyłączony do sieci TN. Sprawdzany przyrząd połączony szeregowo z wzorcowym rezystorem dekadowym i z indukcyjną cewką powietrzną, powinien być włączony między przewód fazowy a ochronny.

Jednocześnie zaleca się, aby [11]: „rozdzielczość wzorca była o jeden rząd lepsza niż sprawdzanego miernika impedancji, a impedancja wzorcowa pozwalała przesunąć prąd względem napięcia o kąt w zakresie między  $0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ”.

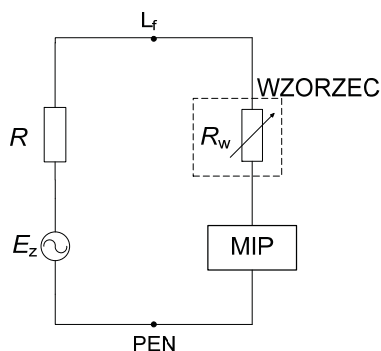
Wzorcowanie miernika impedancji pętli polega na porównaniu wartości zmierzonych z wzorcowymi w ustalonych punktach kontrolnych na wszystkich zakresach pomiarowych i na tej podstawie wyznaczeniu błędu podstawowego. W przypadku, gdy maksymalna wartość błędu podstawowego będzie mniejsza od błędu dopuszczalnego, miernik zostaje dopuszczony do użytku.

Metoda ta nie uwzględnia impedancji transformatora, która może wynosić kilkanaście  $\text{m}\Omega$  co w przypadku sprawdzania zakresów o małych wartościach rzędu setek  $\text{m}\Omega$  może powodować kilkunastoprocentowy błąd. Tym samym wzorcowanie przyrządu do pomiaru impedancji pętli w tym układzie jest obciążone błędem wynikającym ze skończonej impedancji transformatora.

W literaturze omawia się metodę zastępczą wzorcowania przyrządów impedancji pętli, która polega na podaniu napięć obliczonych na podstawie teoretycznych rozważań przez konstruktora (potrzebna znajomość teorii i danych konkretnego przyrządu oraz założenie wartości impedancji wzorcowej) do odpowiednich punktów układu pomiarowego.

Wadą tej metody jest brak bezpośredniego wzorca impedancji oraz konieczność przeprowadzania obliczeń przed przystąpieniem do pomiarów.

Trzecim znanym sposobem wzorcowania jest metoda klasyczna, w której stosuje się źródło o znanej rezystancji wewnętrznej  $R$  (pomijając reaktancję źródła) oraz impedancję wzorcową (rys. 6.2).

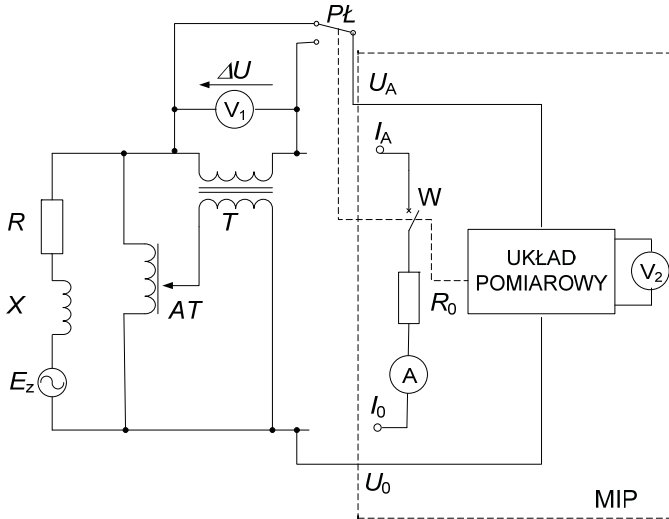


Rys. 6.2. Układ do wzorcowania mierników impedancji pętli metodą klasyczną

Układ ten stosuje się jedynie do wzorcowania mierników o zakresach pomiarowych większych od  $0,5\ \Omega$ .

Inną metodą szacowania dokładności przyrządu jest przeprowadzenie szacunków górnego i dolnego zakresu pomiarowego, zaproponowane przez Nawrockiego i Stafiniaka [40]. Należy jednak podkreślić, że metoda ta ze względu na swe założenia może być stosowana jedynie do zgrubnego oszacowania błędu miernika.

W literaturze opisuje się układy do wzorcowania impedancji pętli zwarciowej, które zapewniają eliminację wpływu impedancji wewnętrznej zasilania na wynik pomiaru [9, 10, 59, 60, 64]. Układem takim jest układ opracowany przez Dobrzańskiego i Nawrockiego [9, 10], który został przedstawiony na rys. 6.3.



Rys. 6.3. Układ do wzorcowania mierników impedancji pętli opracowany przez Dobrzańskiego i Nawrockiego [10]

Różnica napięć  $\Delta U = E - U$  nastawiana jest za pomocą autotransformatora AT połączonego równolegle ze źródłem napięcia  $E_z$  o impedancji  $Z$ . Napięcie  $\Delta U$ , które jest z fazy z napięciem źródłowym  $E$ , mierzone jest woltmierzem  $V_1$ .

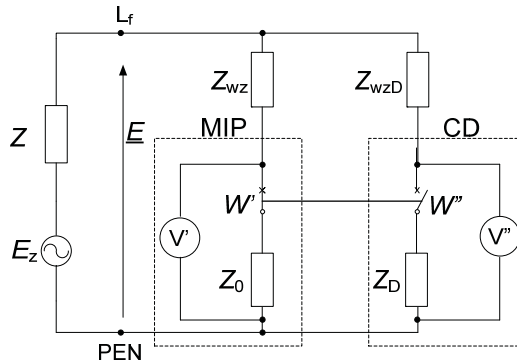
Poprzez przełącznik PŁ na miernik impedancji pętli podawane jest najpierw napięcie źródłowe  $E$ , a potem napięcie sztucznego zwarcia  $U$ . Miernik wyznacza różnicę tych napięć i wskazuje napięcie  $\Delta U_M$ . Dokładność pomiaru napięcia  $\Delta U_M$  wynika z klasy woltmierza  $V_1$ . Wadą tego rozwiązania jest fakt, iż umożliwia on wzorcowanie mierników mierzących tylko różnicę napięć  $\Delta U$ .

Na bazie tego rozwiązania został przez Stafiniaka [64] opracowany sposób i urządzenie do wzorcowania mierników impedancji, który różni się od przedstawionego na rys. 6.3 tym, że tor prądowy jest sterowany z układu pomiarowego i wykonawczego urządzenia do wzorcowania. Proces wzorcowania polega na porównaniu impedancji wyznaczonej przez sprawdzany miernik (na podstawie zmierzonej różnicy napięć  $E - U$  i prądu zwarciowego  $I$ ) z symulowaną wartością impedancji wzorcowej za pomocą urządzenia do wzorcowania. Badanie tego urządzenia zostały przeprowadzone jedynie dla przypadku rezystancyjnego charakteru źródła (czyli przy założeniu, że  $X = 0$ ).

W niniejszym rozdziale przedstawiona została metoda i układ do wzorcowania mierników impedancji pętli, które umożliwiają sprawdzanie mierników oraz zapewniają eliminację wpływu impedancji wewnętrznej źródła zasilania.

## 6.2. Modyfikacje układu do wzorcowania mierników impedancji pętli

Sposób i urządzenie do wzorcowania mierników rezystancji lub impedancji pętli zwarciowej, w którym występuje eliminacja wpływu impedancji wewnętrznej zasilania opracował i opatentował J. Sawicki [58] – rys. 6.4.



Rys. 6.4. Układ do wzorcowania mierników impedancji pętli opracowany przez Sawickiego [60]

W pierwszej gałęzi tego urządzenia znajduje się badany miernik (MIP) połączony szeregowo z rezystorem lub impedorem o znanej wartości  $Z_{wz}$ , a w drugiej gałęzi rezystor lub impedor  $Z_{wzD}$  szeregowo połączony z członem dopełniającym (CD) o parametrach identycznych jak sprawdzany przyrząd. Obie gałęzie są równolegle włączone do źródła zasilania.

Po włączeniu do sieci prąd pomiarowy miernika przepływa przez impedancję wzorcową  $Z_{wz}$  wtedy, gdy przełącznik  $W$  znajduje się w położeniu jak na rys. 6.4.

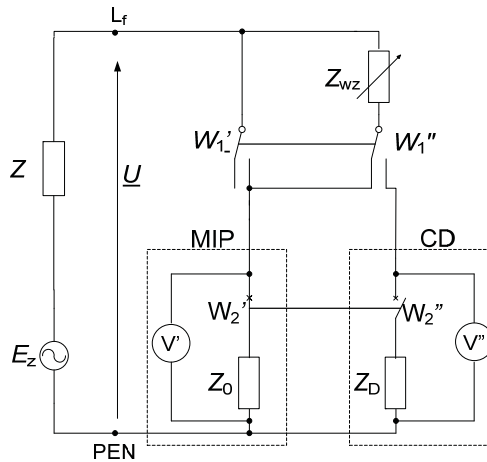
Gdy przełącznik  $W$  jest w drugim położeniu –  $W''$ , wówczas prąd miernika nie płynie, natomiast przez wzorcowy impedor  $Z_{wzD}$  płynie prąd obciążenia dopełniającego  $Z_D$ .

Zaletą tego układu jest zapewnienie znacznej dokładności wzorcowania mierników bez względu na ich typ oraz zakres pomiarowy, możliwość stosowania tego układu nawet przy znacznej impedancji źródła zasilania, jak również fakt, że prąd obciążenia nie zmienia się w czasie pomiaru, a sprawdzany przyrząd mierzy zmiany napięcia proporcjonalne do spadku napięcia na impedorze  $Z_{wz}$ .

Wadą tego rozwiązania jest:

- konieczność wyposażenia go w dwa identyczne impedory wzorcowe  $Z_{wz}$  i  $Z_{wzD}$ . Impedor to element kosztowny, duży, a poza tym zawsze pojawia się trudność w zapewnieniu dwóch identycznych impedorów;
- praktycznie brak możliwości sprawdzania mierników z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym ze względu na brak narzędzi pozwalających zmierzyć fazy napięć. W przypadku sprawdzania mierników impedancji pętli zwarciowej wzorcowanie nie odbywało się w całym zakresie argumentu  $\phi_0$ , a jedynie dla kątów, na jakie zbudowano impedor  $Z_0$  i dla jakich występowało dopasowanie argumentu  $\phi_0$  i  $\phi_w$ .

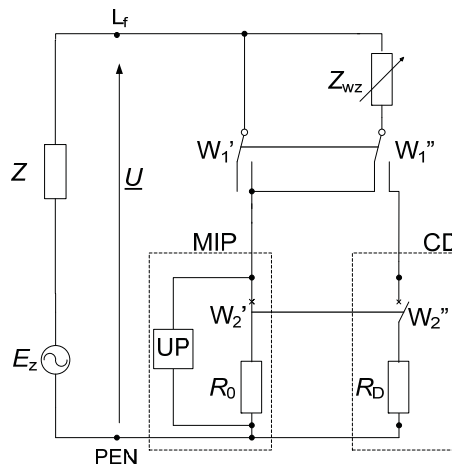
Eliminację pierwszej z wymienionych wad zaproponował P. Prawdzik [46], zastępując dwa impedory wzorcowe jednym  $Z_{wz}$  (rys. 6.5), dzięki czemu zmniejszył się koszt urządzenia do wzorcowania, liczba styków oraz tym samym zwiększyła się dokładność pomiarów.



Rys. 6.5. Układ do wzorcowania mierników impedancji pętli opracowany przez Prawdzika [46]

Idea tego układu do wzorcowania (rys. 6.5) nie zmieniła się w porównaniu z układem opracowanym przez J. Sawickiego. Polega na przyłączaniu naprzemiennie (przez łącznik dwubiegunowy) szeregowo połączonego wzorcowego rezystora lub impedora impedancji pętli  $Z_{wz}$  ze sprawdzanym miernikiem rezystancji lub impedancji pętli bądź członem dopełniającym o parametrach identycznych jak wzorcowany przyrząd. Jednakże nadal nie została wyeliminowana druga z wymienionych wad układu J. Sawickiego.

Autorka jest współtwórcą układu do wzorcowania [59] przedstawionego na rys. 6.6, umożliwiającego sprawdzanie mierników z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym, w którym jako wzorzec zastosowano impedor. Należy podkreślić, że przy wzorcowaniu mierników impedancji pętli w tym układzie nie występuje błąd spowodowany niedopasowaniem argumentów obciążenia i impedancji wzorcowej.



Rys. 6.6. Układ do wzorcowania mierników impedancji pętli;  
MIP – wzorcowany miernik impedancji pętli, CD – człon dopełniający

Zaproponowano następujące modyfikacje układu P. Prawdzika:

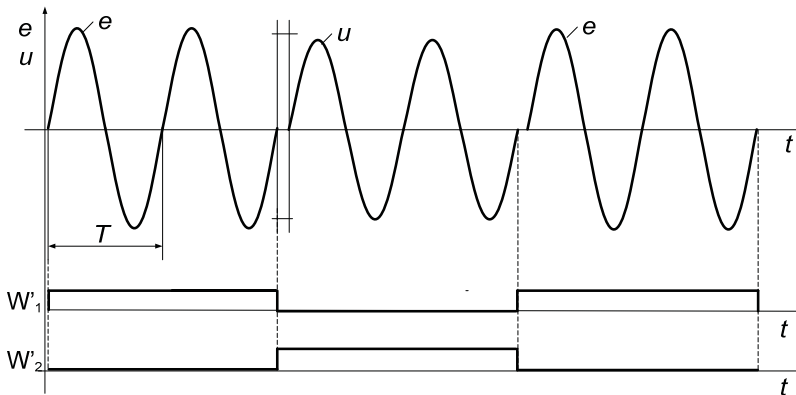
- rolę woltomierza z rysunku 6.4 pełni układ pomiarowy UP składający się z przetwornika napięcia oraz przetwornika a/c i komputera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie,
- rolę przełącznika dwubiegunowego pełni zespół trzech tyrystorów zsynchronizowanych z badanym miernikiem MIP i członem dopełniającym CD,
- pomiar impedancji metodami, w których impedancja wyznaczana jest na podstawie składowych ortogonalnych napięć, dzięki czemu możliwe jest wzorcowanie mierników z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym (nie występuje błąd  $\delta Z_\phi$ ).

Układ składa się ze źródła  $E_z$  o przebiegu sinusoidalnym o impedancji wewnętrznej  $Z$ , z którym połączona jest impedancja wzorcowa  $Z_{wz}$ , oraz sprawdzany miernik impedancji o znanej rezystancji obciążenia pomiarowego  $R_0$  i człon dopełniający obciążenia pomiarowego o parametrach identycznych jak wzorowany przyrząd (rys. 6.6), czyli:

$$R_D = R_0, \quad (6.1)$$

Dzięki czemu przy ustawieniu łącznika  $W_1$  w pozycji  $W_1'$  i  $W_1''$  i jednocześnie odpowiednio łącznika  $W_2$  w pozycji  $W_2'$  i  $W_2''$  w kolejnych cyklach pomiarowych (na czas równy krotności okresu napięcia sieci) uzyskuje się stałe napięcie między punktami  $L_f$ -PEN.

Przebieg napięcia  $e(t)$  i spadku napięcia  $u(t)$  na obciążeniu pomiarowym  $R_0$  i zostały przedstawione na rysunku 6.7.



Rys. 6.7. Przebiegi napięć i sygnału sterującego w układzie do wzorcowania mierników impedancji pętli

Przy odłączonym obciążeniu pomiarowym  $R_0$  miernika (pozycja łączników  $W_1''$  i  $W_2''$ ) napięcie mierzone jest między punktami  $L_f$  a PEN. Fazor tego napięcia określa zależność:

$$\underline{E} = \frac{\underline{E}_z}{(\underline{Z} + \underline{Z}_{wz} + R_D)} (\underline{Z}_{wz} + R_D) \quad (6.2)$$

Natomiast po załączeniu obciążenia pomiarowego  $R_0$  miernika (pozycja łączników  $W_1'$  i  $W_2'$ ) napięcie między punktami  $L_f$  a PEN co do wartości nie zmienia się, a mierzony



jest spadek napięcia na rezystancji obciążenia  $R_0$  sprawdzanego miernika. Fazor tego napięcia opisuje wzór:

$$\underline{U} = \frac{\underline{E}_z}{(\underline{Z} + \underline{Z}_{wz} + R_0)} (\underline{Z}_{wz} + R_0) \frac{R_0}{(\underline{Z}_{wz} + R_0)} \quad (6.3)$$

Na podstawie zmierzonych napięć  $\underline{E}$  i  $\underline{U}$  i po uwzględnieniu zależności (6.2) i (6.3) otrzymujemy zależność na impedancję zmierzoną  $\underline{Z}_{wz}$ ,

$$\underline{Z}_{wz} = R_0 \left| \frac{\underline{E} - \underline{U}}{\underline{U}} \right|, \quad (6.4)$$

wyrażenie to dowodzi, że impedancja wewnętrzna źródła zasilającego  $Z$  nie wpływa na wynik pomiaru.

W procesie wzorcowania miernik realizuje proces pomiarowy w taki sam sposób, jak przy pomiarze impedancji pętli zwarciowej.

### 6.2.1. Sprawdzanie miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem $\psi$

Przedstawiony układ do wzorcowania umożliwia sprawdzanie mierników impedancji pętli z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym, w których pomiar opiera się o wyznaczenie składowych ortogonalnych fazora napięcia. W metodzie z przesunięciem fazowym  $\psi$  fazorowa różnica napięć jest równa:

$$\begin{aligned} |\underline{E} - \underline{U}| &= |\underline{U}_Z| = U_Z = \sqrt{U_R^2 + U_X^2} = \\ &= \sqrt{(E \cos \psi - U)^2 + (E \sin \psi)^2} =, \quad (6.5) \\ &= \sqrt{(E - U)^2 + 2EU(1 - \cos \psi)} \end{aligned}$$

Wówczas szukana wartość impedancji wzorcowej opisana jest następującą zależnością:

$$Z_{wz\psi} = R_0 \left( \frac{|\underline{E} - \underline{U}|}{\underline{U}} \right) = R_0 \sqrt{\frac{(E - U)^2 + 2EU(1 - \cos \psi)}{U^2}} = R_0 \sqrt{\left( \frac{E}{U} - 1 \right)^2 + 4 \frac{E}{U} \sin^2 \frac{\psi}{2}}, \quad (6.6)$$

Podstawiając zależność (6.5) do wzoru (6.6) i uwzględniając, że impedancja wyznaczana jest na podstawie skutecznych wartości napięć  $E_{sk}$  i  $U_{sk}$ , otrzymujemy:

$$Z_{wz\psi} = R_0 \sqrt{\left[ \left( \frac{E_{sk}}{U_{sk}} \right) - 1 \right]^2 + 4 \frac{E_{sk}}{U_{sk}} \sin \left[ \pi \frac{\arctan \left( \frac{Z_{wz} \sin \phi_{wz}}{Z_{wz} \cos \phi_{wz}} \right) T}{2\pi} \right]^2}, \quad (6.7)$$

gdzie wartości skuteczne napięć  $E_{sk}$  i  $U_{sk}$  opisują odpowiednio zależności:

$$E_{sk} = \sqrt{\frac{\int_0^T \left( \frac{E_z \sqrt{(R_D + Z_{wz} \cos \phi_{wz})^2 + (Z_{wz} \sin \phi_{wz})^2}}{\sqrt{(R + R_D + Z_{wz} \cos \phi_{wz})^2 + (X + Z_{wz} \sin \phi_{wz})^2}} \sin(\omega t + \alpha) \right)^2 dt}{T}}, \quad (6.8)$$

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{\int_{t_c}^{t_c+T} \left( \frac{E_z R_0}{\sqrt{(R + R_0 + Z_{wz} \cos \phi_{wz})^2 + (X + Z_{wz} \sin \phi_{wz})^2}} \sin(\omega t + \alpha - \psi) \right)^2 dt}{T}}. \quad (6.9)$$

### 6.2.2. Sprawdzanie miernika działającego w oparciu o metodę wektorową

W przypadku sprawdzania miernika impedancji pętli działającego zgodnie z metodą wektorową szukana wartość impedancji wzorcowej wyraża się zaś zależnością:

$$Z_{wzw} = R_0 \sqrt{\frac{(E_{cw} - Y_{cw})^2 + (E_{bw} - U_{bw})^2}{U_{cw}^2 + U_{bw}^2}}, \quad (6.10)$$

gdzie:  $E_{bw}$  i  $E_{cw}$  są próbkami napięcia źródłowego opisanymi odpowiednio zależnościami:

$$E_{bw} = \sqrt{2} E \sin[\omega(t_1) + \alpha - \psi + \psi_e], \quad (6.11)$$

$$E_{cw} = \sqrt{2} E \cos[\omega(t_2) + \alpha - \psi + \psi_e], \quad (6.12)$$

natomiast  $U_{bw}$  i  $U_{cw}$  są próbkami napięcia występującego w stanie sztucznego zwarcia określonymi wzorami:

$$U_{bw} = \sqrt{2} U \cos[\omega(t_3) + \alpha - \psi], \quad (6.13)$$

$$U_{cw} = \sqrt{2} U \cos[\omega(t_4) + \alpha - \psi]. \quad (6.14)$$

Kąt fazowy obwodu badanego oznaczono  $\psi$

$$\psi_w = \arctan\left(\frac{X_{wz} + X}{R_{wz} + R_0 + R}\right). \quad (6.15)$$

Natomiast kąt fazowy obciążenia i impedancji wzorcowej  $Z_{wz}$  oznaczano jako  $\psi_e$  i określa go następująca zależność:

$$\psi_e = \arctan\left(\frac{X_{wz}}{R_{wz} + R}\right). \quad (6.16)$$

### 6.3. Analiza metrologiczna zastosowanego układu do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej

W niniejszym rozdziale przedstawiona zostanie analiza wrażliwości oraz oszacowanie dokładności układu do wzorcowania pokazanego na rys. 6.6., umożliwiającego wyznaczenie maksymalnego błędu miernika działającego zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$  oraz z metodą wektorową.

Analiza wrażliwości układu wskaże, które z parametrów układu mają najmniejszy, które zaś największy wpływ na dokładność pomiaru.

Źródłem  $E_z$  w tym układzie jest generator sinusoidalnego napięcia i zakłada się, że nie występują błędy spowodowane odchyleniami i wahaniami napięcia sieci oraz odkształceniami napięcia.

Wyeliminowano błąd związany ze stanami przejściowymi, wynikający z włączenia i wyłączenia obciążenia pomiarowego, bowiem wartości obu napięć mierzone są z opóźnieniem  $T$  w stosunku do chwili załączenia rezystancyjnego obciążenia pomiarowego  $R_0$ .

Zakłada się ponadto, że proces wzorcowania odbywa się przy wyłączonych obciążeniach roboczych sieci, w związku z czym błąd od obciążeń roboczych nie występuje, ponieważ wzorcowanie powinno odbywać się przy wyłączonych obciążeniach roboczych.

Dlatego też dokładność wzorcowania zależy od:

- parametrów układu do wzorcowania, czyli dopasowania rezystancji członu dopełniającego  $R_D$  do rezystancji obciążenia pomiarowego  $R_0$  sprawdzanego miernika, dokładności wykonania impedancji wzorcowej, dokładności pomiaru napięć,
- parametrów sprawdzanego miernika: dokładności wykonania rezystancji obciążenia pomiarowego  $R_0$ , dokładności wyznaczenia okresu napięcia sieci  $T$ , dokładności wyznaczenia przesunięcia czasowego  $\tau$  (dla miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem  $\psi$ ), dokładności wyznaczenia chwil czasowych  $t_1$ – $t_4$  (dla miernika opartego na metodzie wektorowej).

W dalszej części tego rozdziału dla oszacowania wrażliwości przyjęto następujące parametry układu do wzorcowania:

- źródło generuje sinusoidalne napięcie o amplitudzie  $E_z = 230$  V i częstotliwości  $f = 50$  Hz,
- impedor wzorcowy o module  $Z_{wz} = 1$   $\Omega$  o dokładności 0,1%, 0,01%, 0,05% i argumentie nastawianym na  $\phi_{wz} = 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75^\circ$  wykonanym z dokładnością do  $5^\circ$ ,
- rezystor obciążenia pomiarowego  $R_0$  jest równy co do wartości rezystancji członu dopełniającego  $R_D = R_0 = 10$   $\Omega$ , oba rezystory wykonane z dokładnością 0,1%, 0,5%,
- przetwornik napięciowy LEM typ CV-500 mierzący z błędem  $\delta E_{przetw} = 0,2\%$ ,
- karta pomiarowa firmy National Instruments typu 6024E mierząca napięcie na poziomie  $\pm 5$  V z dokładnością  $\Delta E_{DAQ} = 7$  mV (tablica 4.3).

Błędy numeryczne w przeprowadzonych analizach nie wnoszą istotnego błędu przy obliczeniach impedancji.

### 6.3.1. Źródła błędów przy wzorcowaniu miernika wyznaczającego impedancję metodą z przesunięciem $\psi$

Funkcja pomiaru impedancji  $Z_{wz\psi}$  w układzie do wzorcowania (rys. 6.6), w którym miernikiem sprawdzanym jest miernik impedancji pętli, wyznaczający szukaną wartość impedancji w oparciu o kąt przesunięcia  $\psi$  między mierzonymi napięciami, zgodnie z zależnością (6.7), jest następująca [14]:

$$Z_{wz\psi} = f(R_0, R_D, Z_{wz}, \phi_{wz}, E, U, \tau, T) \quad (6.17)$$

Dokładność wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej w prezentowanym układzie zależy od:

- niedokładności wykonania rezystancji obciążenia pomiarowego  $\Delta R_0$  sprawdzanego przyrządu oraz rezystancji członu dopełniającego  $\Delta R_D$ ,
- niedokładności wykonania impedancji wzorcowej  $\Delta Z_{wz}$  oraz wartości jej argumentu  $\Delta \phi_{wz}$ ,
- niedokładności pomiaru napięć  $\Delta E$  przed i  $\Delta U$  po załączeniu obciążenia pomiarowego,
- niedokładności pomiaru przesunięcia  $\Delta \tau$  między zmierzonymi napięciami,
- niedokładności wyznaczenia okresu napięcia  $\Delta T$ .

Zgodnie z ogólną regułą przenoszenia błędów [19, 72] bezwzględny błąd pomiaru  $\Delta Z_{\max wz\psi}$  impedancji  $Z_{wz\psi}$  jest następujący:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{\max wz\psi} = & \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial R_0} \cdot \Delta R_0 + \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial R_D} \cdot \Delta R_D + \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial Z_w} \cdot \Delta Z_w + \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial Z_{wz}} \cdot \Delta \phi_{wz} + \\ & + \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial E} \cdot \Delta E + \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial U} \cdot \Delta U + \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial \tau} \cdot \Delta \tau + \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial T} \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (6.18)$$

Natomiast błąd graniczny  $\delta Z_{\max wz\psi}$  (najmniej korzystny przypadek) określa zależność:

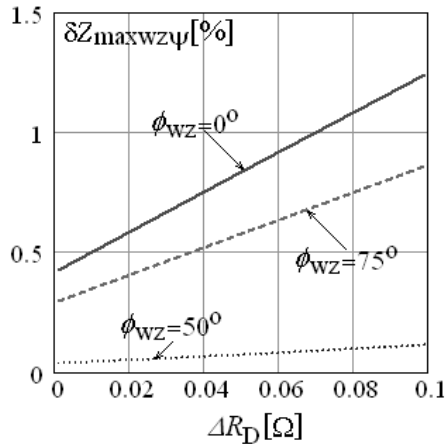
$$\begin{aligned} \delta Z_{\max wz\psi} = & \frac{\Delta Z_{\max wz\psi}}{Z_{wz}} = \left| \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial R_0} \cdot \frac{R_0}{Z_{wz}} \cdot \delta R_0 \right| + \left| \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial R_D} \cdot \frac{R_D}{Z_{wz}} \cdot \delta R_D \right| + \left| \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial Z_w} \cdot \delta Z_w \right| + \\ & + \left| \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial \phi_{wz}} \cdot \frac{\phi_{wz}}{Z_{wz}} \cdot \delta \phi_{wz} \right| + \left| \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial E} \cdot \frac{E}{Z_{wz}} \cdot \delta E \right| + \left| \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial U} \cdot \frac{U}{Z_{wz}} \cdot \delta U \right| + \\ & + \left| \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial \tau} \cdot \frac{\tau}{Z_{wz}} \cdot \delta \tau \right| + \left| \frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial T} \cdot \frac{T}{Z_{wz}} \cdot \delta T \right| \end{aligned} \quad (6.19)$$

Dla oszacowania  $\delta Z_{\max wz\psi}$  określonej zależnością (6.19), wykonano symulacje wpływu poszczególnych parametrów wzoru (6.17) na dokładność pomiaru impedancji pętli.

Prezentowane w dalszych punktach wyniki analiz uzyskano na drodze symulacji poszczególnych składników wzoru (6.19) w programie MathCad.

### 6.3.1.1. Dokładność wykonania rezystorów $R_0$ i $R_D$

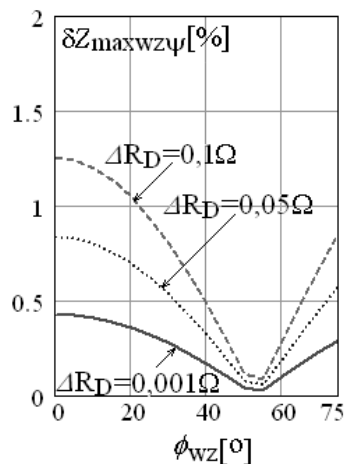
Tolerancja wykonania rezystorów obciążenia pomiarowego  $R_0$  i  $R_D$  wpływa na błąd wzorcowania miernika. Wrażliwość układu na dokładność wykonania rezystora członu dopełniającego  $\Delta R_D$  jest funkcją liniową (rys. 6.8).



Rys. 6.8. Błąd  $\delta Z_{\max wz\psi} = f(\Delta R_D)$  dla danych:  
 $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z_{wz} = 1 \text{ }\Omega$ ,  $R_D = R_0 = 10 \text{ }\Omega$ ,  $\Delta R_0 = 0,05 \text{ }\Omega$ ,  $\phi_{wz} = 0, 50, 75^\circ$

Wraz ze wzrostem niedokładności wykonania rezystorów zarówno członu pomiarowego  $R_0$  jak i rezystora członu dopełniającego  $R_D$  – błąd wzorcowania wzrasta. W przypadku, gdy  $\Delta R_0 = \Delta R_D = 0,05 \text{ }\Omega$ , błąd  $\delta Z_{\max wz\psi}$  nie przekroczy 0,8% dla  $\phi_{wz} = 0^\circ$ .

Należy zauważyć, że wartość współczynnika  $\partial Z_{wz\psi} / \partial R_D$  jest funkcją argumentu impedancji wzorcowej  $\phi_{wz}$  (rys. 6.9).



Rys. 6.9. Błąd  $\delta Z_{\max wz\psi} = f(\phi_{wz})$  dla danych:  
 $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z_{wz} = 1 \text{ }\Omega$ ,  $R_D = R_0 = 10 \text{ }\Omega$ ,  $\Delta R_0 = 0,05 \text{ }\Omega$ ,  $\Delta R_D = 0,001 \text{ } 0,05 \text{ } 0,1 \text{ }\Omega$

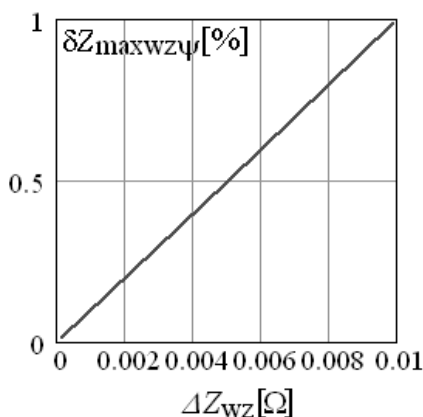
Współczynnik ten maksymalną wartość przyjmuje dla  $\phi_{wz} = 0^\circ$  (dla  $\Delta R_0 = 0,05 \Omega$ ,  $\Delta R_D = 0,1 \Omega$  nie przekracza 1,5%), natomiast minimum osiąga dla  $\phi_{wz} = 55^\circ$  (dla  $\Delta R_0 = 0,05 \Omega$ ,  $\Delta R_D = 0,001 \Omega$  nie przekracza 0,09%).

### 6.3.1.2. Tolerancja wykonania wzorca impedancji

Dokładność wzorcowania w zaprezentowanym układzie zależy również od wartości impedancji  $Z_{wz}$  oraz dokładności wykonania modułu wzorca  $\Delta Z_{wz}$  i dokładności wykonania argumentu  $\Delta \phi_{wz}$ . Im większa wartość impedancji wzorca  $Z_{wz}$ , tym większa wartość zmierzzonej różnicy napięć  $\underline{E} - \underline{U}$ , a tym samym większa dokładność pomiarów. Impedancja wzorcowa  $Z_{wz}$ , zgodnie z [11], powinna mieć rozdzielczość wskazań przynajmniej o jeden rząd większą niż sprawdzany przyrząd, dlatego w symulacjach przyjęto  $\Delta Z_{wz} = 0,0001, 0,005, 0,01 \Omega$  oraz  $\Delta \phi_{wz} = 0 \div 5^\circ$ . Współczynnik  $\partial Z_{wz\psi} / \partial Z_{wz}$  jest liniowy (rys. 6.10), wraz ze wzrostem niedokładności wykonania modułu wzorca, liniowo rośnie niedokładność wzorcowania w prezentowanym układzie. W przypadku najmniej korzystnym, czyli dla impedancji wzorcowej wykonanej z następującą dokładnością:  $\Delta Z_{wz} = 0,01 \Omega$  i  $\Delta \phi_{wz} = 5^\circ$ , sprawdzanie miernika impedancji pętli będzie obciążone błędem rzędu 1%.

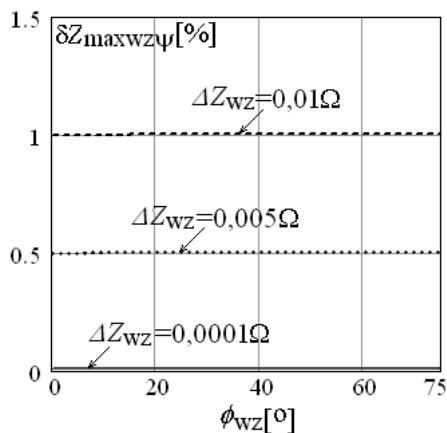
Dokładność nastawy kąta fazowego impedancji wzorcowej  $\phi_{wz}$  w zakresie od  $0^\circ$  do  $5^\circ$  [11] nie wpływa na dokładność procesu wzorcowania miernika.

Współczynnik  $\partial Z_{wz\psi} / \partial Z_{wz}$  nie zależy od wartości kąta fazowego impedancji wzorcowej  $\phi_{wz}$  (rys. 6.11).



Rys. 6.10. Błąd  $\delta Z_{\max wz\psi} = f(\Delta Z_{wz})$  dla danych:

$$E_z = 230 \text{ V}, Z_{wz} = 1 \Omega, R_D = R_0 = 10 \Omega, \\ \phi_{wz} = 75^\circ, \Delta \phi_{wz} = 5^\circ$$



Rys. 6.11. Błąd  $\delta Z_{\max wz\psi} = f(\phi_{wz})$  dla danych:

$$E_z = 230 \text{ V}, Z_{wz} = 1 \Omega, \\ R_D = R_0 = 10 \Omega, \phi_{wz} = 0^\circ, \Delta Z_{wz} = 0,0001, 0,005, \\ 0,01 \Omega, \Delta \phi_{wz} = 5^\circ$$

### 6.3.1.3. Dokładność pomiaru napięcia

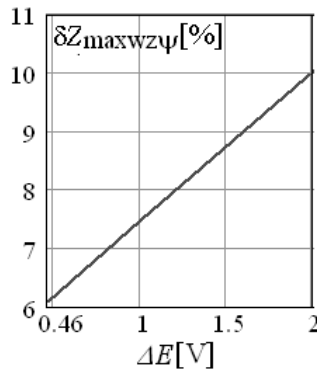
Dokładność wzorcowania zależy również od dokładności pomiaru napięcia  $E$  przed i  $U$  po załączeniu rezystancyjnego obciążenia pomiarowego  $R_0$ .

Analogicznie do pomiaru impedancji pętli zwarciowej, błąd pomiaru napięcia  $\Delta E_\psi$  zależy od następujących czynników:

— niedokładności przetwarzania napięcia przez przetwornik  $\Delta E_{\text{przetw}}$ ,

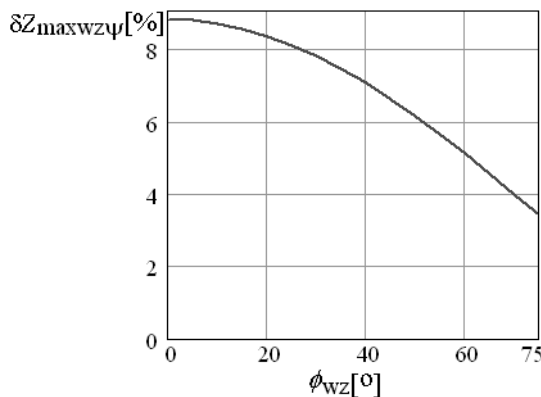
- błędu konwersji a/c sygnału pomiarowego  $\Delta E_{\text{DAQ}}$ ,
- błędu  $\Delta E_{\text{sk}}$  wynikającego z wyznaczenia wartości skutecznej napięcia z niecałkowitej liczby spróbkowanych okresów.

Na podstawie rozważań przeprowadzonych w rozdziale 4.3.2.3. i zgodnie z danymi z tablicy 4.3 całkowity błąd pomiaru napięcia jest równy  $\Delta E_{\psi} = 1,54 \text{ V}$ . Ze względu na fakt, że w analogiczny sposób i używając tego samego sprzętu korzysta się, wyznaczając wartość napięcia  $U$  po załączeniu obciążenia pomiarowego, zakłada się, że  $\Delta U_{\psi} = \Delta E_{\psi}$ . Dla danych:  $Z_{\text{wz}} = 1 \Omega$ ,  $R_{\text{D}} = R_0 = 4 \Omega$ ,  $\phi_{\text{wz}} = 0^\circ$ , co przekłada się na błąd pomiaru impedancji  $\delta Z_{\text{max wz}\psi} = 8,8\%$  (rys. 6.12).



Rys. 6.12. Błąd  $\delta Z_{\text{max wz}\psi} = f(\Delta E_{\psi})$  dla danych:  
 $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z_{\text{wz}} = 1 \Omega$ ,  $R_{\text{D}} = R_0 = 4 \Omega$ ,  $\phi_{\text{wz}} = 0^\circ$

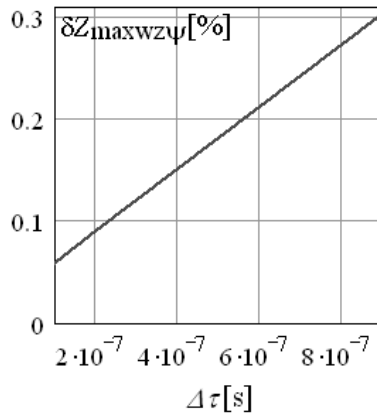
Istotne jest, że wartość tego błędu zmienia się w funkcji argumentu  $\phi_{\text{wz}}$  (rys. 6.13), maksymalną wartość przyjmuje dla  $\phi_{\text{wz}} = 0^\circ$ , a minimalną dla  $\phi_{\text{wz}} = 75^\circ$ .



Rys. 6.13.  $\delta Z_{\text{max wz}\psi} = f(\phi_{\text{wz}})$  dla danych:  
 $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z_{\text{wz}} = 1 \Omega$ ,  $R_{\text{D}} = R_0 = 4 \Omega$ ,  $\Delta E_{\psi} = \Delta U_{\psi} = 1,54 \text{ V}$

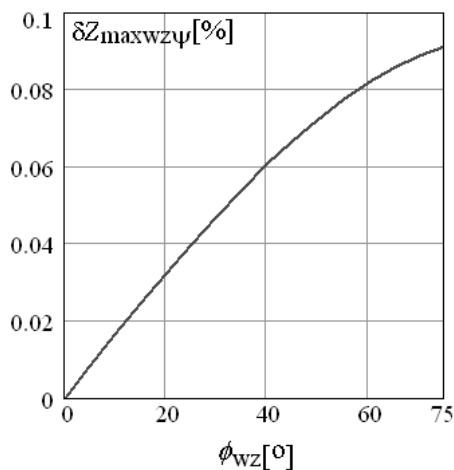
6.3.1.4. Dokładność wyznaczenia przesunięcia  $\tau$ 

Analizując dokładność wzorcowania, należy także uwzględnić błędy wynikające z zasady działania miernika. W przypadku metody z przesunięciem  $\psi$  istotną rolę odrywa dokładność pomiaru przesunięcia liniowego  $\tau$  między napięciami  $\underline{E}$  i  $\underline{U}$ . Dla okresu próbkowania  $T_p$  równego  $0,5\mu\text{s}$  dokładność pomiaru przesunięcia  $\Delta\tau$  (wyznaczonego metodą aproksymacji chwil przejść przez zero, dla sygnału sinusoidalnego w rozdziale 4.3.2.5.) jest  $0,3\mu\text{s}$ , co przekłada się na błąd pomiaru impedancji pętli  $\delta Z_{\text{max wz}\psi}$  rzędu  $0,12\%$  (rys. 6.14).



Rys. 6.14. Błąd  $\delta Z_{\text{max wz}\psi} = f(\Delta\tau)$  dla danych:  
 $E_z = 230\text{ V}$ ,  $Z_{\text{wz}} = 1\ \Omega$ ,  $R_D = R_0 = 10\ \Omega$ ,  $\phi_{\text{wz}} = 75^\circ$

Błąd pomiaru przesunięcia  $\Delta\tau$  zależy od wartości argumentu impedancji wzorcowej  $\phi_{\text{wz}}$  (rys. 6.15) i wartość maksymalną przyjmuje dla  $\phi_{\text{wz}} = 75^\circ$ .

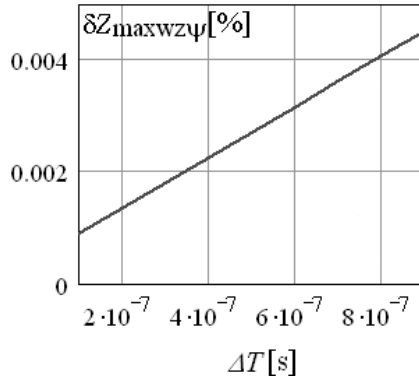


Rys. 6.15. Błąd  $\delta Z_{\text{max wz}\psi} = f(\phi_{\text{wz}})$  dla danych:  
 $E_z = 230\text{ V}$ ,  $Z_{\text{wz}} = 1\ \Omega$ ,  $R_D = R_0 = 10\ \Omega$ ,  $\Delta\tau = 0,3\ \mu\text{s}$ .



### 6.3.1.5. Dokładność wyznaczenia okresu $T$ napięcia

Parametrem miernika wpływającym na dokładność wzorcowania w przedstawionym układzie jest błąd wyznaczenia okresu napięcia  $\Delta T$ . Przy założeniu, że  $\Delta T = \Delta \tau$  wpływ błędu  $\Delta T$  na dokładność pomiaru impedancji okazał się o dwa rzędy mniejszy niż błędu wyznaczenia przesunięcia liniowego  $\Delta \tau$  (rys. 6.16).



Rys. 6.16. Błąd  $\delta Z_{\max wz\psi} = f(\Delta T)$  dla danych:  $E_z = 230$  V,  $Z_{wz} = 1$   $\Omega$ ,  $R_D = R_0 = 10$   $\Omega$ ,  $\phi_{wz} = 75^\circ$

### 6.3.2. Źródła błędów przy wzorcowaniu miernika wyznaczającego impedancję metodą wektorową

Funkcja pomiaru impedancji  $Z_{wzw}$  w układzie do wzorcowania (rys. 6.6), w którym sprawdzanym przyrządem jest miernik impedancji pętli, wyznaczający szukaną wartość impedancji w oparciu o metodę wektorową, ma następującą postać:

$$Z_{wzw} = f(R_0, R_D, Z_{wz}, \phi_{wz}, E_b, E_c, U_b, U_c, t_1, t_2, t_3, t_4) \quad (6.20)$$

Jak wynika z funkcji pomiaru, dokładność wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej, działających zgodnie z metodą wektorową, zależy od:

- niedokładności wykonania rezystancji obciążenia pomiarowego  $\Delta R_0$  sprawdzanego przyrządu oraz rezystancji członu dopełniającego  $\Delta R_D$ ,
- niedokładności wykonania impedancji wzorcowej  $\Delta Z_{wz}$  oraz jej argumentu  $\Delta \phi_{wz}$ ,
- niedokładności pomiaru napięć  $\Delta E_b$ ,  $\Delta E_c$  przed i  $\Delta U_b$ ,  $\Delta U_c$  po załączeniu obciążenia pomiarowego  $R_0$ ,
- niedokładności wyznaczenia chwil czasowych  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$ ,  $\Delta t_4$ .

Błąd pomiaru  $\Delta Z_{wzw}$  impedancji  $Z_{wzw}$  opisuje następująca zależność:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{\max wz\psi} = & \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial R_0} \cdot \Delta R_0 + \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial R_D} \cdot \Delta R_D + \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial Z_{wz}} \cdot \Delta Z_{wz} + \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial \phi_{wz}} \cdot \Delta \phi_{wz} + \\ & + \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial E_b} \cdot \Delta E_b + \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial E_c} \cdot \Delta E_c + \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial U_b} \cdot \Delta U_b + \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial U_c} \cdot \Delta U_c + \\ & + \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial t_1} \cdot \Delta t_1 + \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial t_2} \cdot \Delta t_2 + \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial t_3} \cdot \Delta t_3 + \frac{\partial Z_{wzw}}{\partial t_4} \cdot \Delta t_4. \end{aligned} \quad (6.21)$$

Celem dalszej analizy jest znalezienie błędu granicznego  $\delta Z_{\max \text{wzw}}$  pomiaru impedancji  $Z_{\text{wzw}}$  szacowanego według wzoru:

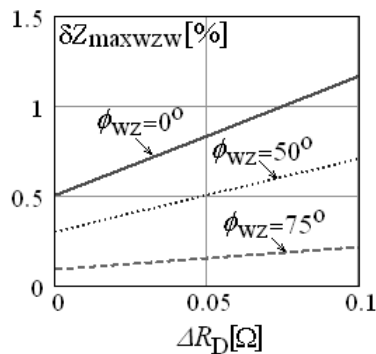
$$\begin{aligned} \delta Z_{\max \text{wzw}} = \frac{\Delta Z_{\max \text{wzw}}}{Z_{\text{wz}}} = & \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial R_0} \cdot \frac{R_0}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta R_0 \right| + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial R_D} \cdot \frac{R_D}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta R_D \right| + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial Z_{\text{wz}}} \cdot \delta Z_{\text{wz}} \right| + \\ & + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial \phi_{\text{wz}}} \cdot \frac{\phi_{\text{wz}}}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta \phi_{\text{wz}} \right| + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial E_b} \cdot \frac{E_b}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta E_b \right| + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial E_c} \cdot \frac{E_c}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta E_c \right| + \\ & + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial U_b} \cdot \frac{U_b}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta U_b \right| + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial U_c} \cdot \frac{U_c}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta U_c \right| + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial t_1} \cdot \frac{t_1}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta t_1 \right| + \\ & + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial t_2} \cdot \frac{t_2}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta t_2 \right| + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial t_3} \cdot \frac{t_3}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta t_3 \right| + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial t_4} \cdot \frac{t_4}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta t_4 \right|. \end{aligned} \quad (6.22)$$

Dla oszacowania błędu  $\delta Z_{\max \text{wzw}}$ , określonego zależnością (6.22), wykonano symulacje wpływu poszczególnych parametrów wzoru (6.19) na dokładność pomiaru impedancji pętli.

Prezentowane w dalszych punktach wyniki analiz uzyskano na drodze symulacji przeprowadzonych w programie MathCad dla poszczególnych składników wzoru (6.22).

### 6.3.2.1. Dokładność wykonania rezystorów $R_0$ i $R_D$

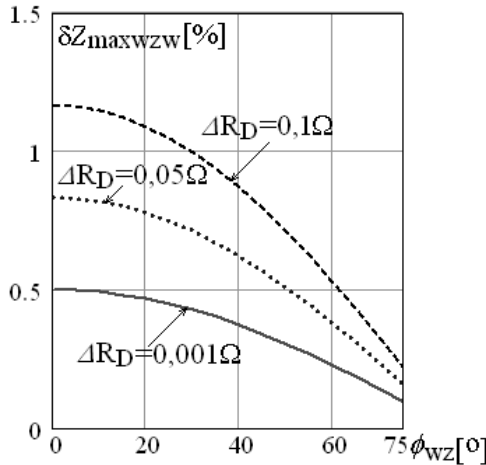
Niedokładność wykonania rezystorów członu dopełniającego  $\Delta R_D$  i obciążenia pomiarowego  $\Delta R_0$  ma taki sam wpływ jak w przypadku wzorcowania miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem  $\psi$  (rys. 6.7). Błąd wzorcowania, jak wskazuje rysunek 6.17, liniowo zależy od tolerancji rezystora  $R_D$ .



Rys. 6.17. Błąd  $\delta Z_{\max \text{wzw}} = f(\Delta R_D)$  dla danych:  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z_{\text{wz}} = 1 \Omega$ ,  $R_D = R_0 = 10 \Omega$ ,  $\Delta R_0 = 0,05 \Omega$ ,  $\phi_{\text{wz}} = 0, 50, 75^\circ$

W przypadku gdy  $\Delta R_0 = \Delta R_D = 0,05 \Omega$ , błąd  $\delta Z_{\max \text{wzw}}$  największą wartość przyjmuje dla  $\phi_{\text{wz}} = 0^\circ$  i wynosi ona 0,85%. Zwiększenie wartości rezystancji członu obciążenia  $\Delta R_D = 0,1 \Omega$  (wówczas  $\Delta R_D \neq \Delta R_0$ ) powoduje, że wartość błędnej wartości impedancji  $\delta Z_{\max \text{wzw}}$  przekroczy 1%. Dlatego też tak istotna jest w tym układzie dbałość o równość tych dwóch rezystancji.

Zależność współczynnika  $\partial Z_{wzw}/\partial R_D$  od argumentu impedancji wzorcowej  $\phi_{wz}$  przedstawia rys. 6.18.



Rys. 6.18. Błąd  $\delta Z_{\max wzw} = f(\phi_{wz})$  dla danych:

$$E_z = 230 \text{ V}, Z_{wz} = 1 \Omega, R_D = R_0 = 10 \Omega, \Delta R_0 = 0,05 \Omega, \Delta R_D = 0,001, 0,05, 0,1 \Omega$$

Współczynnik ten wartość maksymalną przyjmuje dla  $\phi_{wz} = 0^\circ$  (dla  $\Delta R_0 = 0,05 \Omega$ ,  $\Delta R_D = 0,1 \Omega$  nie przekracza 1,5% – tak samo jak w przypadku wzorcowania miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem  $\psi$  (rys. 6.8)), natomiast wartość minimalną osiąga dla  $\phi_{wz} = 75^\circ$  (dla  $\Delta R_0 = 0,05 \Omega$ ,  $\Delta R_D = 0,001 \Omega$  nie przekracza 0,095%).

### 6.3.2.2. Tolerancja wykonania wzorca impedancji

Dokładność wykonania wzorca  $Z_{wz}$  wpływa w taki sam sposób na dokładność wzorcowania miernika działającego w oparciu o metodę wektorową, jak w przypadku sprawdzania miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem  $\psi$ .

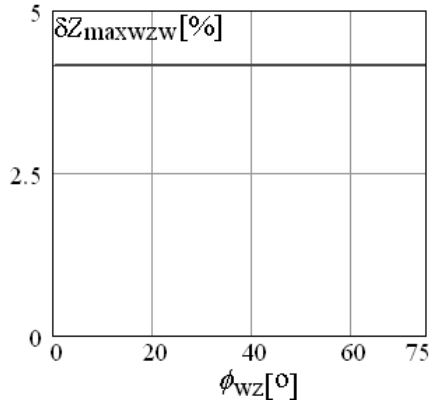
Współczynnik  $\partial Z_{wzw}/\partial Z_{wz}$  jest liniowy, wraz ze wzrostem niedokładności wykonania modułu wzorca liniowo rośnie niedokładność wzorcowania w prezentowanym układzie i wartości błędów pokrywają się z wynikami uzyskanymi dla metody z przesunięciem  $\psi$  (rys. 6.10).

Dla  $Z_{wz} = 0,01 \Omega$  i  $\Delta \phi_{wz} = 5^\circ$  błąd  $\delta Z_{\max wzw}$  nie przekracza 1%. Niedokładność nastawy kąta fazowego impedancji wzorcowej  $\Delta \phi_{wz}$  w zakresie do  $5^\circ$  również nie wpływa znacząco na dokładność procesu wzorcowania miernika, tak samo jak w przypadku, gdy wzorcowany był miernik działający zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$ .

### 6.3.2.3. Dokładność pomiaru napięcia

Kolejnym źródłem błędów w procesie wzorcowania jest dokładność pomiaru czterech wartości chwilowych napięć  $E_b$ ,  $E_c$ ,  $U_b$  i  $U_c$ . Błąd wyznaczenia każdej pojedynczej próbki napięcia  $\Delta E_w$  zależy od dokładności przetwarzania napięcia przez przetwornik  $\Delta E_{\text{przetw}}$  oraz błędów konwersji a/c sygnału pomiarowego  $\Delta E_{\text{DAQ}}$  (błędy te zostały wyznaczone w rozdziale 4, a ich wartości zestawiono w tablicy 4.3). Całkowity graniczny błąd pomiaru napięcia każdej z próbek  $\Delta E_b = \Delta E_c = \Delta U_b = \Delta U_c = \Delta E_w$  można wyznaczyć z zależności (4.67).

Do dalszych analiz przyjęto dane wykonanego układu do wzorcowania, w którym jako przetwornik a/c zastosowano kartę pomiarową firmy National Instruments 6024E, a rolę przetwornika napięciowego pełni LEM CV-500. Zgodnie z tym, całkowity graniczny błąd pomiaru napięcia  $\Delta E_w$  wynosi 0,8 V. W tym przypadku błąd pomiaru impedancji nie powinien przekroczyć 4,2% (rys. 6.19).

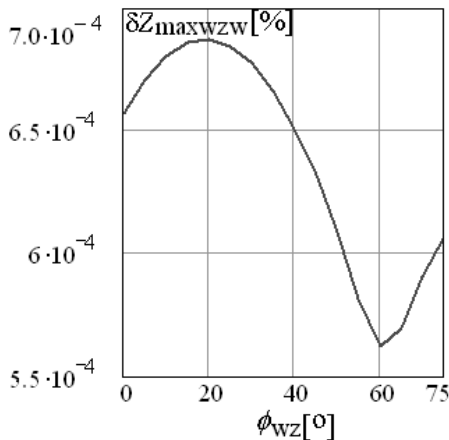


Rys. 6.19. Błąd  $\delta Z_{\max wzw} = f(\phi_{wz})$  dla danych:  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z_{wz} = 1 \Omega$ ,  $R_D = R_0 = 4 \Omega$ ,  $\Delta E_w = 0,8 \text{ V}$

Błąd  $\Delta E$  nie zależy od wartości argumentu  $\phi_{wz}$  (rys. 6.19).

#### 6.3.2.4. Dokładność wyznaczenia momentów czasowych

Na dokładność wzorcowania wpływ ma również błąd wyznaczenia momentów czasowych  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ , w których pobierane są próbki napięcia. Zgodnie z zależnością (4.69) błędy te zależne są od błędu pomiaru okresu napięcia sieci  $\Delta T$ , czasu próbkowania  $T_p$  oraz położenia danej próbki.



Rys. 6.20. Błąd  $\delta Z_{\max wzw} = f(\phi_{wz})$  dla danych:  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z_{wz} = 1 \Omega$ ,  $R_D = R_0 = 10 \Omega$ ,  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t_4 = 0,5 \mu\text{s}$

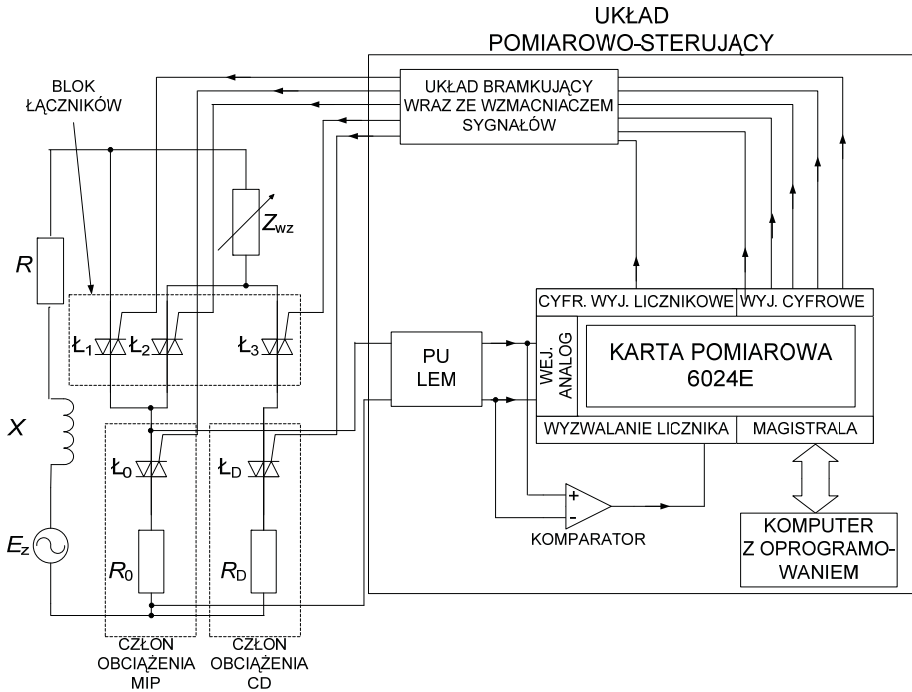
Przyjmując dane pomiarowe: okres próbkowania  $T_p = 0,5 \mu s$ , całkowitą liczbę próbek  $N=20000$ , błąd pomiaru okresu napięcia źródłowego  $\Delta T = 0,3 \mu s$  oraz następujące chwile czasowe  $t_1 = 1100T_p$ ,  $t_2 = 1350T_p$ ,  $t_3 = 13100T_p$ ,  $t_4 = 13350T_p$ , otrzymuje się, że błąd wyznaczenia każdej chwili czasowej jest równy  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t_4 = 0,5 \mu s$ .

Na rysunku 6.20 przedstawiono wpływ błędu wyznaczenia chwil czasowych  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t_4$  rzędu  $0,5 \mu s$  na dokładność pomiaru impedancji pętli zwarciowej.

Rysunek 6.20 potwierdza, że błąd pomiaru impedancji  $\delta Z_{\max wz}$  stanowi odpowiedni składnik we wzorze (6.22), jego wartość jest rzędu  $10^{-4} \%$ .

#### 6.4. Realizacja fizycznego układu do wzorcowania miernika impedancji pętli zwarciowej

Struktura układu do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej, w którym eliminowany jest wpływ impedancji wewnętrznej źródła na dokładność wzorcowania, przedstawia rys. 6.21.



Rys. 6.21. Struktura miernika badanego wraz z układem do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej

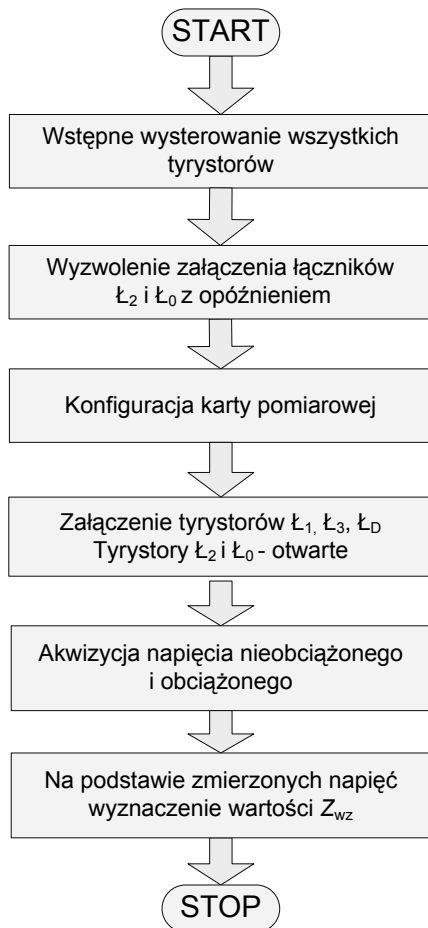
Układ składa się ze:

- źródła napięcia  $E_z$  o przebiegu sinusoidalnym i impedancji wewnętrznej źródła  $Z$ ,
- impedancji wzorcowej  $Z_{wz}$  – odpowiednio dobranej do zakresu sprawdzanego miernika,
- bloku obciążenia sprawdzanego miernika impedancji pętli zwarciowej z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym  $R_0$  – złożonego z szeregowo połączonej rezystancji  $R_0$  oraz łącznika tyrystorowego  $\Lambda_0$ ,

- członu dopełniającego – o parametrach identycznych jak człon obciążenia pomiarowego wzorcowanego przyrządu, czyli  $R_D = R_0$ ,
- układu pomiarowo sterującego. Układ ten przejmuje w trakcie wzorcowania funkcje układu sterującego miernika, przy czym jego struktura jest identyczna jak struktura badanego miernika. Ponadto układ pomiarowo-sterujący według rys. 6.21 steruje również procesem wzorcowania, załączając w odpowiednich chwilach elementy bloku łączników. Głównym elementem układu pomiarowo-sterującego jest karta pomiarowa mająca na celu akwizycję napięcia oraz sterowanie pracą łączników  $\mathbb{L}_1$ ,  $\mathbb{L}_2$  i  $\mathbb{L}_3$  załączających naprzemian wzorcowany przyrząd lub człon obciążenia dopełniającego.

Integralną częścią układu jest zaprojektowane oprogramowanie w środowisku LabVIEW, które ma za zadanie: w odpowiednich chwilach czasowych generować sygnały sterujące, umożliwiać akwizycję sygnału pomiarowego oraz wyznaczyć parametry potrzebne do obliczenia impedancji wzorcowej  $Z_{wz}$ .

Algorytm programu umożliwiającego wzorcowanie przyrządów do pomiaru impedancji pętli został przedstawiony na rys. 6.22.

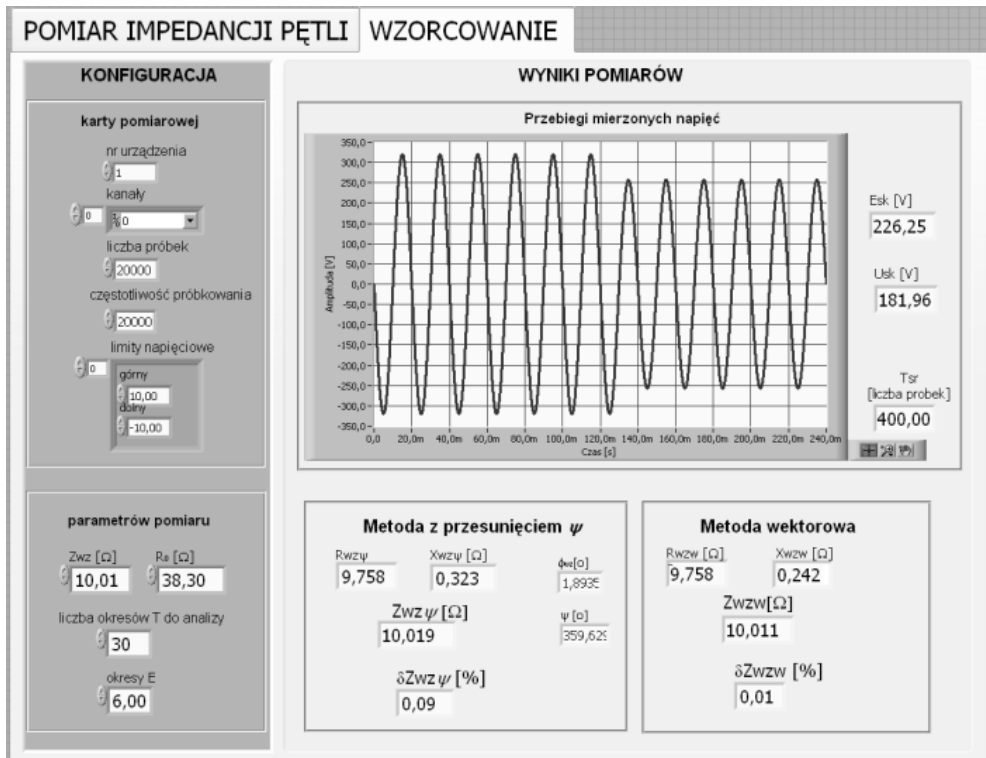


Rys. 6.22. Algorytm programu umożliwiającego wzorcowanie MIP

Zgodnie z tym algorytmem pierwszym krokiem jest wstępne wysterowanie wszystkich tyristorów w układzie pomiarowym. Następnie ustawione jest wyzwolenie załączenia tyristorów  $L_2$  i  $L_0$  z zadaniem opóźnieniem. Dalej dokonywana jest konfiguracja karty pomiarowej. Kolejny etap to załączenie tyristorów  $L_1$ ,  $L_3$ ,  $L_D$  tak, aby prąd przepływał przez impedancję wzorcową  $Z_{wz}$  oraz człon dopełniający i w tym czasie dokonywana jest akwizycja napięcia źródłowego.

Następnie załączane są tyristory  $L_2$  i  $L_0$  tak, aby prąd pomiarowy płynął przez sprawdzany miernik i mierzony jest spadek napięcia na obciążeniu pomiarowym  $R_0$ . Ostatnim etapem jest wyznaczenie wartości napięć, przesunięcia między nimi  $\psi$  oraz obliczenie impedancji  $Z_{wz}$  i wyświetlenie wyniku na panelu.

Panel układu do wzorcowania został przedstawiony na rysunku 6.23.



Rys. 6.23. Panel urządzenia do wzorcowania mierników impedancji pętli, pomiar przeprowadzono dla danych  $E_z = 230$  V,  $Z_{wz} = 10,0134$  Ω,  $R_0 = 38,3$  Ω

Użytkownik ma możliwość konfiguracji karty pomiarowej oraz ustawienia parametrów pomiaru. Przedstawione na panelu przyrządu przebiegi napięć oraz wyniki wzorcowania przyrządu obiema metodami pozwalają na porównanie wyników pomiarów uzyskanych dla każdej z metod.

## 6.5. Wyniki badań eksperymentalnych układu do wzorcowania

Badanie eksperymentalne w układzie do wzorcowania przeprowadzono dla następujących danych:

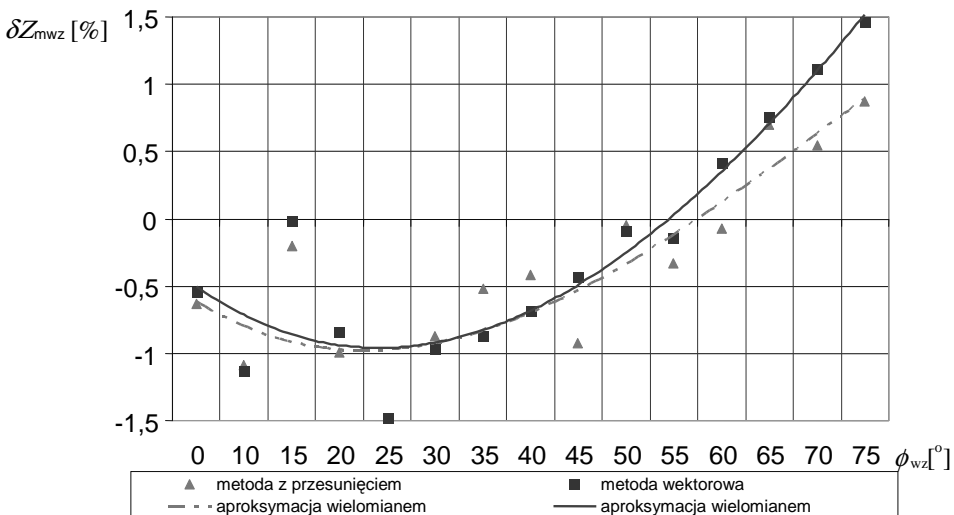
- zasilanie sinusoidalne z generatora Agilent o amplitudzie  $E_z = 230$  V i częstotliwości 50 Hz,
- impedor wzorcowy  $Z_{wz}$  o module 10  $\Omega$  i regulowanym argumentcie  $\phi_{wz}$  w zakresie  $0 \div 75^\circ$ ,
- rolę rezystora obciążenia pomiarowego  $R_0$  i członu dopełniającego  $R_D$  pełniły rezystory 38,4  $\Omega$ , o dopuszczalnym prądzie  $I = 4$  A i błędzie 0,1%,
- okres próbkowania  $T_p$  równy 0,5  $\mu$ s,  $N = 20000$ .

W związku z tym, że źródłem napięcia jest generator napięcia sinusoidalnego, założono, że podczas przeprowadzania eksperymentu nie występowały wahania i odchylenia napięcia. Wyeliminowano skutki stanu przejściowego, wynikające z naprzemiennego załączania obciążenia pomiarowego oraz członu dopełniającego, wprowadzając opóźnienie równe jeden okres  $T$  przy obliczaniu wartości napięć.

W zrealizowanym układzie do wzorcowania MIP zastosowano cztery łączniki zamiast pięciu (bez łącznika  $L_D$  z rys. 6.21), co jest uzasadnione przy zastosowaniu łączników o zbieżnych charakterystykach. Łączniki półprzewodnikowe mogą powodować błąd pomiaru, który można skorygować w procesie kalibracji układu wzorcującego.

Proces kalibracji przeprowadzono przy sinusoidalnym kształcie napięcia o amplitudzie 230V i częstotliwości 50Hz. W miejscu impedancji wzorcowej  $Z_{wz}$  włączano w układ rezystory (trzy rezystory normalne, każdy o rezystancji  $R_N = 10,0134$   $\Omega$ , połączone w różnych konfiguracjach), dające rezystancję równą 5,0067  $\Omega$ , 10,0134  $\Omega$ , 20,0268  $\Omega$  i 30,0406  $\Omega$ . Natomiast rolę obciążenia pomiarowego pełnił rezystor  $R_0 = 38,3$   $\Omega$ , o dopuszczalnym prądzie  $I = 4$  A i błędzie 0,1%.

Pomiary te wykazały występowanie w układzie wzorcującym błędu multiplikatywnego równego 1,022 i addytywnego  $-0,37$   $\Omega$ , zarówno gdy sprawdzany jest miernik działający zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$ , jak i metodą wektorową. Oba te błędy zostały uwzględnione w oprogramowaniu i wynik jest odpowiednio korygowany.



Rys. 6.24. Błąd  $\delta Z_{mwz} = f(\phi_{wz})$  dla danych:  $E_z = 230$  V,  $Z_{wz} = 10,17$   $\Omega$ ,  $R_0 = R_D = 38,3$   $\Omega$



Dokonano sprawdzenia dokładności procesu wzorcowania po uwzględnieniu korekcji, włączając w miejscu impedancji wzorcowej  $Z_{wz}$  jeden rezystor normalny  $R_N = 10,1324 \Omega$ . Błąd wzorcowania w tym wypadku, niezależnie od metody działania miernika (czy jest to metoda z przesunięciem  $\psi$ , czy też wektorowa) nie przekraczał 0,2%.

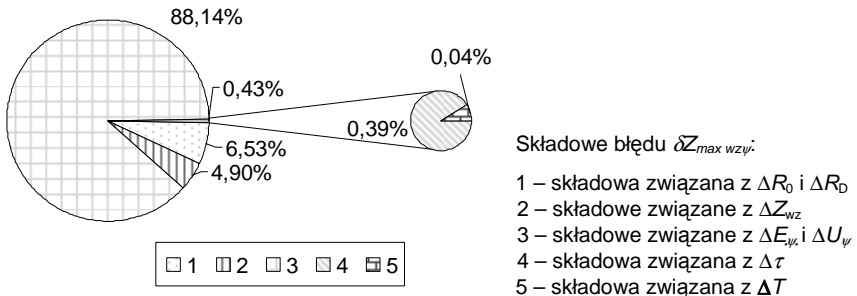
Sprawdzono, jaki będzie błąd wzorcowania przy włączeniu jako wzorca impedora  $Z_{wz} = 10,17 \Omega$ , dla  $\phi_{wz} = 0 \div 75^\circ$ . Gdy wzorcowany miernik działał zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$  wartość błędu zawierała się w przedziale  $-1\%$  do  $1\%$ , natomiast, gdy miernik realizował metodę wektorową błąd  $\delta Z_{wz}$  należał do przedziału od  $-1,5\%$  do  $1,5\%$  (rys. 6.24). Powodem wzrostu błędu wzorcowania (w porównaniu z wynikami uzyskanymi, gdy rolę impedancji wzorcowej pełni rezystor normalny) jest dokładność wykonania impedora wzorcowego.

Wyniki przeprowadzonych badań fizycznego modelu układu do wzorcowania potwierdzają, że wartość impedancji wewnętrznej źródła nie wpływa na wynik pomiaru.

## 6.6 Podsumowanie badań symulacyjnych i eksperymentalnych układu do wzorcowania

### 6.6.1. Badania symulacyjne

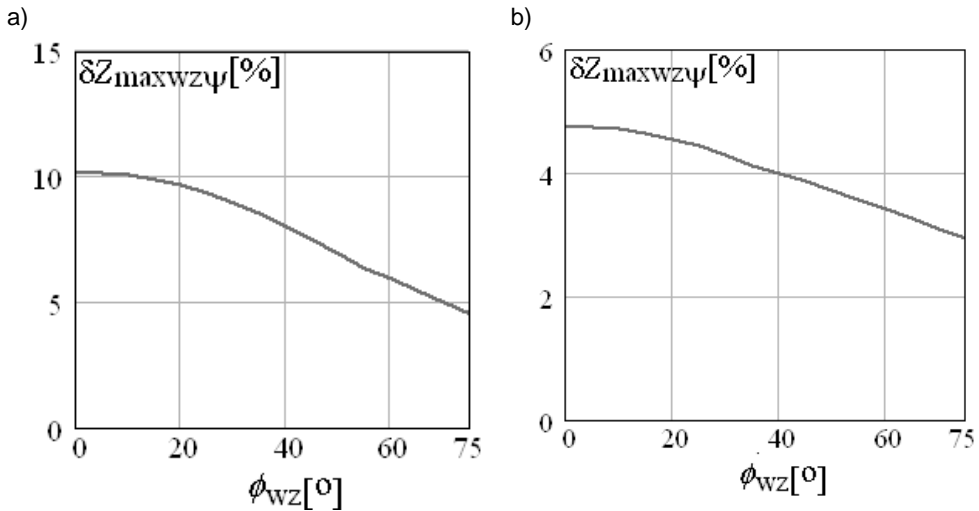
Na podstawie przeprowadzonej analizy wrażliwości układu do wzorcowania okazało się, że w przypadku, gdy sprawdzany jest miernik działający w oparciu o wyznaczenie przesunięcia między napięciami  $\psi$ , największy wpływ na dokładność wzorcowania ma (w kolejności malejącej) – rys. 6.25: błąd pomiaru napięcia  $\Delta E_\psi$  i  $\Delta U_\psi$ , tolerancja wykonania rezystora obciążenia pomiarowego sprawdzanego przyrządu  $R_0$  oraz rezystora członu dopełniającego  $R_D$ , tolerancja wykonania impedora wzorcowego  $Z_{wz}$  i nastawy argumentu  $\phi_{wz}$  oraz dokładność wyznaczenia przesunięcia czasowego  $\Delta \tau$  między napięciami.



Rys. 6.25. Szacunek udziałów poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji pętli zwarciowej  $\delta Z_{max\ wz\ \psi}$  w układzie do wzorcowania mierników działających zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$  dla przyjętych parametrów:  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z_{wz} = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 4 \Omega$ ,  $\Delta R_0 = \Delta R_D = 0,02 \Omega$ ,  $\Delta E_\psi = \Delta U_\psi = 1,54 \text{ V}$ ,  $\Delta \tau = \Delta T = 0,3 \mu\text{s}$ ,  $\Delta Z_{wz} = 0,005 \Omega$

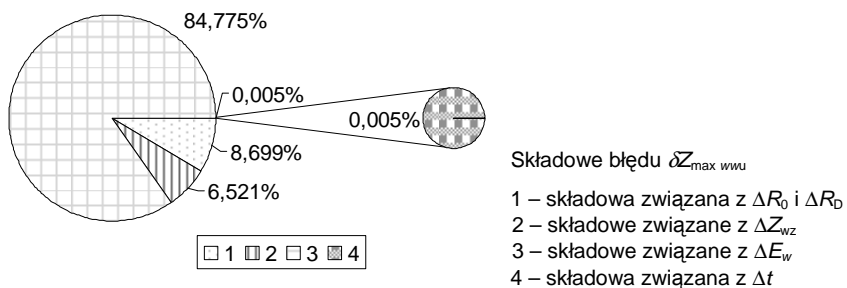
Przeprowadzona analiza metrologiczna wykazuje, że całkowity błąd wzorcowania  $\delta Z_{max\ wz\ \psi} = f(\phi_{wz})$ , dla danych:  $\Delta E_\psi = \Delta U_\psi = 1,54 \text{ V}$ ,  $\Delta R_D = \Delta R_0 = 0,02 \Omega$ ,  $\Delta Z_{wz} = 0,005 \Omega$ ,  $\Delta \tau = \Delta T = 0,3 \mu\text{s}$ , obliczony zgodnie ze wzorem (7.19), powinien być mniejszy od 10,2% (rys. 6.26a). W przypadku zwiększenia wartości impedancji wzorcowej  $Z_{wz}$  do  $4 \Omega$ , całko-

wity błąd wzorcowania  $\delta Z_{\max w z \psi}$  znacznie zmniejszy się i nie powinien przekroczyć 5% (rys. 6.26b).



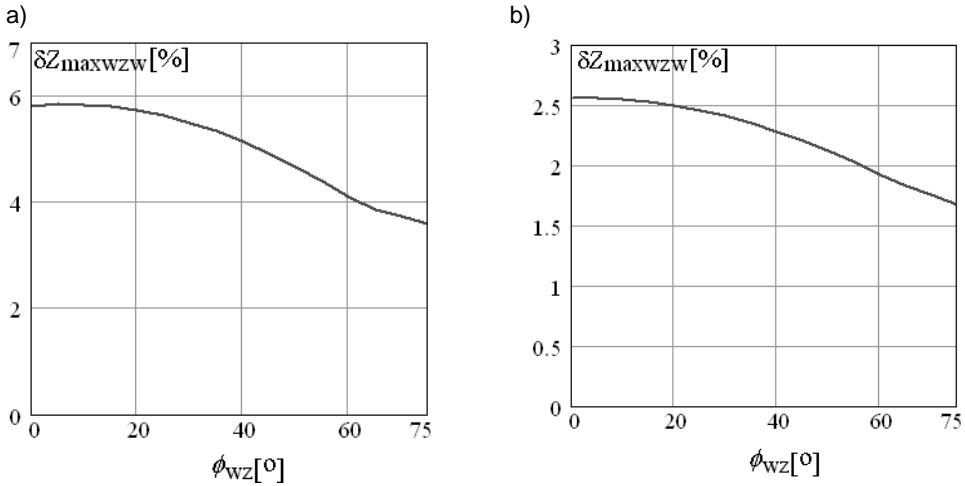
Rys. 6.26. Błąd  $\delta Z_{\max w z \psi} = f(\phi_w)$  dla danych:  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_D = R_0 = 4 \Omega$ ,  $\Delta E_\psi = \Delta U_\psi = 1,54 \text{ V}$ ,  $\Delta R_D = \Delta R_0 = 0,02 \Omega$ ,  $\Delta Z_{wz} = 0,005 \Omega$ ,  $\Delta \phi_{wz} = 5^\circ$ ,  $\Delta \tau = \Delta T = 0,3 \mu\text{s}$ , a)  $Z_{wz} = 1 \Omega$ , b)  $Z_{wz} = 4 \Omega$

Przeprowadzona analiza wrażliwości układu do wzorcowania dowodzi, że gdy wzorcowany jest miernik działający w oparciu o metodę wektorową, największy wpływ na dokładność wzorcowania ma (w kolejności malejącej): błąd pomiaru napięcia  $\Delta E_w$ , tolerancja wykonania rezystorów obciążenia pomiarowego sprawdzanego przyrządu  $R_0$  i członu dopełniającego  $R_D$ , tolerancja wykonania impedancji wzorcowej  $Z_{wz}$  (rys. 6.27).



Rys. 6.27. Szacunek udziałów poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji pętli zwarcowej  $\delta Z_{\max w z w}$  w układzie do wzorcowania mierników działających zgodnie z metodą wektorową dla przyjętych parametrów:  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $Z_{wz} = 1 \Omega$ ,  $R_0 = 4 \Omega$ ,  $\Delta R_0 = \Delta R_D = 0,02 \Omega$ ,  $\Delta E_\psi = \Delta U_\psi = 1,54 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 0,5 \mu\text{s}$ ,  $\Delta Z_{wz} = 0,005 \Omega$

Całkowity błąd wzorcowania  $\delta Z_{\max w z w} = f(\phi_{wz})$ , dla danych:  $\Delta E_w = 0,8 \text{ V}$ ,  $\Delta R_D = \Delta R_0 = 0,02 \Omega$ ,  $\Delta Z_{wz} = 0,005 \Omega$ ,  $\Delta T = 0,3 \mu\text{s}$ ,  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t_4 = 0,5 \mu\text{s}$ , nie przekracza 6% (rys. 6.29a). W przypadku zwiększenia wartości impedancji wzorcowej do  $Z_{wz} = 4 \Omega$ , całkowity błąd wzorcowania  $\delta Z_{\max w z w}$  nie przekroczy 2,6% (rys. 6.28b).



Rys. 6.28. Błąd  $\delta Z_{\max wzw} = f(\phi_{wz})$  dla danych:  $E_z = 230 \text{ V}$ ,  $R_D = R_0 = 4 \Omega$ ,  $\Delta E_w = 0,8 \text{ V}$ ,  $\Delta R_D = \Delta R_0 = 0,02 \Omega$ ,  $\Delta Z_{wz} = 0,005 \Omega$ ,  $\Delta \phi_{wz} = 5^\circ$ ,  $\Delta T = 0,3 \mu\text{s}$ ,  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t_4 = 0,5 \mu\text{s}$ ;  
 a)  $Z_{wz} = 1 \Omega$ , b)  $Z_{wz} = 4 \Omega$

Przedstawiony w rozdziale szóstym układ do wzorcowania mierników impedancji pętli, w których wyznaczenie impedancji opiera się o składowe ortogonalne napięcia (metoda z przesunięciem  $\psi$  i metoda wektorowa), pozwala sprawdzać mierniki niezależnie od wartości impedancji wewnętrznej źródła.

Przeprowadzone analizy tego układu dowodzą, że, ze względu na dokładność procesu wzorcowania w tym układzie, szczególne znaczenie ma dobór rezystora członu dopełniającego tak, aby jego wartość rezystancji była możliwie zbliżona do wartości rezystora obciążenia pomiarowego i by odznaczał się dużą dokładnością wykonania. Bardzo istotny jest również precyzyjny pomiar napięć.

### 6.6.2. Badania eksperymentalne

Przeprowadzone badania doświadczalne układu do wzorcowania MIP potwierdzają, że w układzie tym eliminowany jest wpływ na wynik pomiaru impedancji źródła zasilania. Wyniki tych badań potwierdzają wnioski wypływające z analiz symulacyjnych, wskazujące, że dokładność wzorcowania zależy głównie od błędu pomiaru napięcia, tolerancji wykonania rezystorów obciążenia pomiarowego sprawdzanego przyrządu  $R_0$  i członu dopełniającego  $R_D$ , oraz tolerancji wykonania impedora wzorcowego  $Z_{wz}$ .

Błąd procesu wzorcowania, gdy w miejscu impedora wzorcowego  $Z_{wz}$  włączono rezystor normalny, niezależnie od metody działania miernika nie przekracza 0,2%.

## Rozdział 7

### PODSUMOWANIE

Przedstawiona książka dotyczy problematyki związanej z pomiarami impedancji pętli w sieciach niskiego napięcia. Tematyka ta jest ciągle ważna i stale rozwijana ze względu na bezpośredni związek z zagadnieniami dotyczącymi bezpieczeństwa użytkowania urządzeń elektrycznych – na podstawie pomiaru impedancji pętli zwarcia oceniana jest skuteczność samoczynnego wyłączenia jednego z podstawowych środków ochrony przeciwporażeniowej.

Analiza teoretyczna klasycznych metod pomiaru impedancji pętli zwarcia z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym dokonana przez autorkę wykazała, że błąd pomiaru impedancji tymi metodami może osiągać wartości niedopuszczalne przez przepisy.

Znacznie dokładniejsze wyniki można uzyskać, stosując metody, w których impedancja wyznaczana jest na podstawie składowych ortogonalnych fazora napięcia: metodę z przesunięciem  $\psi$  i metodę wektorową. Jednakże, aby móc to jednoznacznie stwierdzić, konieczne było przeprowadzenie analizy metrologicznej metody z przesunięciem  $\psi$  i metody wektorowej. Zaletą tych metod jest eliminacja błędu fazowego oraz, z racji zastosowania rezystancyjnego obciążenia pomiarowego, mała masa i gabaryty przyrządu.

Przedstawiono podstawy teoretyczne tych metod oraz wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych obu metod, które dowiodły, że obie metody pozwalają na dokładniejszy pomiar impedancji pętli zwarciowej niż metody klasyczne z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym oraz pozwoliły sprecyzować zasadę wyboru metody w zależności od parametrów sieci zasilającej. Przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych fizycznego modelu miernika realizującego pomiar zarówno metodą z przesunięciem  $\psi$ , jak i metodą wektorową. Uzyskano zbieżność wyników uzyskanych z analiz symulacyjnych i doświadczalnych.

Zarówno w metodzie z przesunięciem  $\psi$ , jak i w metodzie wektorowej nie występuje błąd fazowy, dlatego można je implementować w miernikach z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym, dzięki czemu miernik odznacza się małą masą i gabarytami oraz koszt jego wykonania jest niższy.

Bardziej wrażliwa na odkształcenia krzywej napięcia jest metoda wektorowa. Dlatego mierniki wykorzystujące tę metodę powinny być wyposażone w wejściowe układy filtrujące tak, aby odfiltrować wszystkie harmoniczne oprócz podstawowej. Wówczas miernik wykonujący pomiar impedancji pętli metodą wektorową może być stosowany do pomiaru impedancji pętli w sieciach o napięciu odkształconym.

Badania eksperymentalne obu metod pomiaru impedancji pętli wykazały, że w praktycznych warunkach przeprowadzania pomiaru, możliwy jest pomiar impedancji pętli z błędem nie przekraczającym 3%. Badania doświadczalne potwierdziły również wyniki otrzymane z symulacji, mówiące, że dokładność miernika działającego zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$  jak i metodą wektorową związana jest głównie z błędem pomiaru napięcia, tolerancją wykonania obciążenia pomiarowego oraz dokładnością wyznaczenia przesunięcia między napięciami  $\psi$ , w przypadku metody z przesunięciem  $\psi$ .

Przeprowadzono również badania symulacyjne i eksperymentalne urządzenia do wzorcowania mierników, w których mierzoną impedancję wyznacza się na podstawie skła-

dowych ortogonalnych napięcia. Uzyskane wyniki z badań symulacyjnych i eksperymentalnych potwierdziły, że urządzenie to pozwala na wzorcowanie mierników impedancji pętli zwarciowej, eliminując wpływ impedancji źródła na wynik pomiaru. Błąd procesu wzorcowania, gdy rolę wzorca pełni rezystor normalny, nie przekracza 0,2%.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Bielański K.: *Sposób i badania skuteczności zerowania lub uziemienia w urządzeniach elektrycznych oraz urządzenie do stosowania tego sposobu*. Patent nr 45296, 1961.
- [1] Bielański K.: *Metoda pomiaru oporności i reaktancji pętli zwarciowej zerowania i uziemienia*. Część I, Energetyka nr 6/1965, s. 179–180; część II Energetyka nr 7/1965, s. 217–220.
- [2] Cegielski M.: *Metoda pośredniego pomiaru impedancji pętli zwarciowej*. Część I, prace Instytut Automatyki Systemów Energetycznych, nr 1/1964, s. 211–227.
- [3] Czapp S., Roskosz R.: *Analiza dokładności pomiaru impedancji pętli zwarciowej z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr 17, XI Cykl Seminarium „Zastosowanie komputerów w nauce i technice 2001”, Gdańsk 2001, s. 11–18.
- [4] Czapp S.: *Metoda wektorowa pomiaru impedancji pętli zwarciowej w obecności zakłóceń*. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, promotor Ryszard Roskosz, Gdańsk 2002.
- [5] Danzer P., Vierfuss H.: *Beitrag zur Messung der Impedanzen von Niederspannungsnetzen*. ETZ-A, 87, nr 5, 1966.
- [6] Danzer P.: *Impedance measurement in low voltage systems*. Proc. Of 5<sup>th</sup> International Symposium on Short Circuit, vol. 1, Warsaw 1992.
- [7] DIN 57413 Teil3. Deutsche Normen Schleifenwiderstands – Messgerate.
- [8] Dobrzański A., Nawrocki Z.: *Urządzenie do wzorcowania mierników rezystancji lub impedancji obwodu zwarciowego*. Patent nr 176231z dn.06.06.1995
- [9] Dobrzański A., Nawrocki Z.: *Układy i urządzenia do wzorcowania mierników impedancji obwodu zwarciowego*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 7/1995, s. 178-181.
- [10] Dziennik Urzędowy Miar i Probiernictwa nr 3 z dnia 30 marca 1999r. Zarządzenie Prezesa Głównego Urzędu Miar i Probiernictwa nr 12 i 13 w sprawie wprowadzenia przepisów metrologicznych i instrukcji sprawdzania mierników pętli zwarcia.
- [11] Golijanek-Jędrzejczyk A., Roskosz R.: *Oprogramowanie przyrządu wirtualnego do pomiaru impedancji pętli zwarciowej*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr 18, XII Cykl Seminariów „Zastosowanie Komputerów w Nauce i Technice”, Gdańsk 2002, s. 63-70.
- [12] Golijanek-Jędrzejczyk A., Świsulski D., Roskosz R.: *Wpływ błędów pomiaru okresu na dokładność wyznaczenia impedancji pętli zwarciowej w sieciach o napięciu odkształconym*. Kongres Metrologii 2004, tom II, Wrocław 2004, s. 657–660.
- [13] Golijanek-Jędrzejczyk A., Roskosz R.: *Układ do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr 21, XV Cykl Seminariów „Zastosowanie komputerów w nauce i technice”, Gdańsk 2005, s. 111–118.
- [14] Havelka F.: *Novy sposob pro rychlon a spolechtivon kontrolu nulowani*. Energetika, z. 3/1953.
- [15] Iwicki M.: *Nowy przyrząd do kontroli rezystancji pętli zwarciowej i sprawdzania prawidłowości połączeń ochronnych*. Wiadomości Elektrotechniczne 10/1971.
- [16] Iwicki M., Roskosz R., Sawicki J.: *Sposób bezpośredniego pomiaru impedancji pętli zwarciowej w niskonapięciowych urządzeniach elektroenergetycznych i urządzenie do stosowania tego sposobu*. Nr patentu 75168 z dn. 16.03.1972.
- [17] Iwicki M., Roskosz R.: *Urządzenie do bezpośredniego pomiaru rezystancji pętli zwarciowej w elektrycznych instalacjach niskiego napięcia*. Nr patentu 75219 z dn. 25.03.1972.
- [18] Kalus-Jęcek B., Kuśmierk Z.: *Wzorce wielkości elektrycznych i ocena niepewności pomiaru*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000.
- [19] Kluger A., Skubis T.: *Programowany wzorec wartości skutecznej napięcia przemiennego*. Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemysle SP '2000, Materiały konferencyjne, Zielona Góra 2000, s. 151.

- [20] Kuśmierk Z., Groszek S.: *Technika pomiarów i badań urządzeń elektroenergetycznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.
- [21] Markiewicz H.: *Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [22] Masny J., Osiński S., Teresiak Z.: *Wielkopiędowy miernik skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w górnictwie*. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, nr 10/1971, s. 57–67.
- [23] Masny J.: *Krytyczna ocena metod pomiaru impedancji pętli zwarciowych*. Praca Naukowe Instytutu Energoelektroniki Politechniki Wrocławskiej nr 28/1975.
- [24] Masny J.: *Pomiary impedancji pętli zwarciowej*. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 10/1987, s. 16–21.
- [25] Mindykowski J.: *Ocena jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych z układami przeskątnikowymi*. Polska Akademia Nauk Komitet Elektrotechniki. Seria Wydawnicza Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki, Okrętownictwo i Żegluga sp. z o.o., tom 44, Gdańsk 2001.
- [26] Musiał E.: *Jak unikać błędów przy badaniu skuteczności uziemień ochronnych i zerowania w instalacjach 380/220V*. Gospodarka Paliwami i Energią. Zeszyt 12/1965, s. 393–399.
- [27] Musiał E.: *Zagrożenia pochodzące od urządzeń elektrycznych*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1992.
- [28] Musiał E.: *Wybrane zagadnienia z zakresu ochrony przeciwporażeniowej i zabezpieczeń nadprądowych w instalacjach i sieciach elektroenergetycznych w pytaniach i odpowiedziach*. Biuletyn SEP INPE nr 19/1998, s. 25–36.
- [29] Musiał E.: *Instalacje i urządzenia elektroenergetyczne*. WSP, Warszawa 1998.
- [30] Musiał E., Jabłoński W.: *Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać urządzenia elektroenergetyczne niskiego napięcia w zakresie ochrony przeciwporażeniowej-nowelizacja projektu*. Biuletyn SEP INPE nr 24/1999, s. 3–56.
- [31] Nawrocki Z.: *Urządzenie do pomiaru impedancji pętli zwarciowej*. Nr patentu 128417 z dn. 15.07.1985.
- [32] Nawrocki Z.: *Urządzenie do pomiaru impedancji pętli zwarciowej*. Nr patentu 129468 z dn. 15.07.1985.
- [33] Nawrocki Z.: *Urządzenie do pomiaru impedancji pętli zwarciowej*. Nr patentu 128597 z dn. 15.07.1985.
- [34] Nawrocki Z., Stafiniak A.: *Parametry i rozwiązania układowe mierników rezystancji i impedancji pętli zwarcia*. I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Bezpieczne urządzenia energoelektroniczne, tom I, Warszawa-Międzyzlesie 1987, s. 219–226.
- [35] Nawrocki Z.: *Nowa zasada pomiaru impedancji obwodu zwarciowego*. Przegląd Elektrotechniczny nr 7/1988, s. 199–201.
- [36] Nawrocki Z., Dobrzański A., Tyliński A.: *Wykorzystanie inżynierii metoda pomiarowych przy projektowaniu miernika do pomiaru impedancji obwodu zwarciowego*. Przegląd Elektrotechniczny nr 9/1994, s. 233–236.
- [37] Nawrocki Z., Stafiniak A.: *Analiza metrologiczna cyfrowego miernika impedancji obwodu zwarciowego*. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Bezpieczeństwo elektryczne. Tom I, Wrocław, 1999, s. 425–431.
- [38] Nawrocki Z.: *Urządzenie do pomiaru impedancji obwodu zwarciowego*. Nr patentu 179242 z dn. 31.08.2000.
- [39] Nawrocki Z., Stafiniak A.: *Sprawdź swój miernik impedancji lub rezystancji pętli zwarciowej*. elektro.info nr 11/2004, s. 30–34.
- [40] Norma PN-IEC 60364-6-61:2000 *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych*. Sprawdzenie, Sprawdzenia odbiorcze.
- [41] Norma PN-EN 50160:2002 *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*.
- [42] Nowotny M., Sedlacek M.: *New Class of Time Domain Algorithms of RMS Value Measurement of Non-Coherently Sampled Signals*. 14<sup>th</sup> IMEKO Symposium on New Technologies in Meas-

- urement and Instrumentation and 10<sup>th</sup> Workshop on ADC Modeling and Testing, vol. I, Gdynia 2005, p. 235–240.
- [43] Pawłowski E., Referowski L., Świsulski D.: *Sprawdzenie częstotliwościomierzy cyfrowych w układzie z odbiornikiem częstotliwości wzorcowej DCF77*. Przegląd Elektrotechniczny 5/2002, s. 163–167.
- [44] Piasecki J.: *Uproszczone obliczanie prądów zwarciovych w niskonapięciowych instalacjach zakładów przemysłowych*. Gospodarka Paliwami i Energią nr 6/1968, s. 1–5.
- [45] Prawdzik P.: *Urządzenie do skalowania mierników rezystancji i impedancji pętli zwarcioviej*. Patent nr 122493 1985.
- [46] Roskosz R., Swędrowski L., Lewandowski J.: *Nowa metoda pomiaru rezystancji pętli zwarcioviej w urządzeniach elektrycznych niskiego napięcia*. Przegląd Elektrotechniczny nr 5/1973, s. 201–204.
- [47] Roskosz R.: *Podstawowe cechy mierników impedancji pętli zwarcioviej*. Przegląd Elektrotechniczny nr 10/1988, s. 317–319.
- [48] Roskosz R.: *Błędy w pomiarach impedancji pętli zwarcioviej wynikające z krótkotrwałego przepływu prądu pomiarowego*. XVII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów. Materiały konferencyjne, Politechnika Poznańska, Poznań 1985, tom II, s. 121–126.
- [49] Roskosz R.: *Sposób i układ do cyfrowego pomiaru modułu impedancji pętli zwarcioviej*. Nr pat. 160064 z dn.16.12.1988.
- [50] Roskosz R.: *Przyrządy typu MR do pomiaru impedancji pętli zwarcioviej*. Przegląd Elektrotechniczny nr 6/1990, s. 125–127.
- [51] Roskosz R.: *A new method for measurement of earth fault loop impedance*. IEEE Transaction on Power Delivery, vol.6, nr 2/1991, p. 546–549.
- [52] Roskosz R.: *Sposób i układ do pomiaru składowych ortogonalnych oraz modułu wektora impedancji pętli zwarcioviej z eliminacją wpływu wybranych harmonicznyc na wynik pomiaru*. Patent nr 169205 z dn. 28.06.1996.
- [53] Roskosz R.: *Method and instrument for automatic measurement of earth fault loop impedance*. Proc. IMEKO 5th TC-4 Symposium, Vienna 1992, s. 101–110.
- [54] R. Roskosz: *Sposób i układ do pomiaru modułu impedancji pętli zwarcioviej*. Patent RP nr 159 333 z dn. 31.12.1992.
- [55] Roskosz R.: *Nowe rozwiązania pomiaru impedancji pętli zwarcioviej przy odkształceniu krzywej napięcia w miejscu badania*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka nr 79, Gdańsk 1995.
- [56] Roskosz R.: *Metoda pomiaru impedancji zwarcioviej oparta na zastosowaniu rezystancyjnego obciążenia pomiarowego*. APM'2000. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr 14. Gdańsk 2000.
- [57] Roskosz R., Czapp S., Galla S., Golijanek-Jędrzejczyk A.: *Sposób i układ do pomiaru składowych ortogonalnych oraz modułu wektora impedancji pętli zwarcioviej*. Opis patentowy PL 199312.
- [58] Roskosz R, Swędrowski L., Świsulski D., Golijanek-Jędrzejczyk A., Dzwonkowski A., Ziółko M.: *Sposób i układ do wzorcowania cyfrowych mierników impedancji pętli zwarcioviej działających w oparciu o składowe ortogonalne mierzone napięcie*. Zgłoszenie patentowe nr P-382988 z dnia 24.07.2007.
- [59] Sawicki J.: *Sposób i urządzenie do skalowania mierników rezystancji lub impedancji pętli zwarcioviej*. Patent 92351 z dn. 31.01.1976.
- [60] Sawicki J., Roskosz R.: *Układ do sprawdzania mierników rezystancji zwarcioviej*. Sympozjum Naukowo-Techniczne w MERA-ZSM, Warszawa 1976, s. 1–8.
- [61] Swędrowski L., Roskosz R.: *Urządzenie do bezpośredniego pomiaru rezystancji pętli zwarcioviej w elektrycznych sieciach niskiego napięcia*. Patent nr 73243 z dn. 15.10.1976.
- [62] Stafiniak A.: *Źródła błędów w pomiarach impedancji pętli zwarcioviej*. XXXII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów, Rzeszów 2000, s. 525–530.
- [63] Stafiniak A.: *Metoda pomiaru małych wartości impedancji obwodu zwarciovego*. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, promotor Zdzisław Nawrocki, Wrocław 2002.



- [64] Stafiniak A.: *Analiza metrologiczna metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej przy wykorzystaniu przetworników analogowych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 54/2003, s. 335–350.
- [65] Streuber M.: *Beitrag zur indirekten Messung der Kurzschlussstromme in Drehstrom-Niederspannungsanlagen der Industrie*. Elektrische, z. 6/1968.
- [66] Strzelewicz R.: *Mikroprocesorowy miernik impedancji pętli zwarciowej z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym*. Praca dyplomowa pod kierunkiem R. Roskosza, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Gdańsk 2000.
- [67] Sumner M., Palethorpe B., Thomas W. P.: *Impedance Measurement for Improved Power Quality – Part 1: The Measurement Technique*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no 3/2004, p. 1457–1463.
- [68] Szafran J., Wiszniewski A.: *Algorytmy pomiarowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
- [69] Świsulski D.: *Analiza dokładności cyfrowego pomiaru okresu zakłóconego napięcia sinusoidalnego w warunkach dynamicznych*. Krajowy Kongres Metrologii KKM '2001, Warszawa 2001, s. 497–500.
- [70] Tagg A.: *The measurement of earth loop resistance*. IEEE Proceed., vol. 104, no 15/1957.
- [71] Taylor John R.: *Wstęp do analizy błęd pomiarowego*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [72] Teresiak Z.: *Metody pomiarów oporności pętli zwarciowej zerowania ochronnego*. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 11/1963, s. 135–139.
- [73] Teresiak Z.: *Ocena uproszczonych metod obliczeń prądów zwarców jednofazowych w sieciach TN. Bezpieczeństwo elektryczne*. XII Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna. tom 1, Wrocław 1999, s. 151–162.
- [74] Teresiak Z.: *Obliczenia prądu zwarciowego dla sprawdzenia ochrony przeciwporażeniowej w sieciach TN*. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Bezpieczeństwo Elektryczne. tom II, Wrocław 1999, s. 37–50.
- [75] Ter-Oganesjan J.: *O principle postrojenia schem proborow dla izmierenija petli faza-nul*. Promysznaja Eneretika, nr 4/1957.
- [76] Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o zmianie ustawy prawo budowlane (Dz. U. Nr 93 poz. 888) artykuł 62 pkt 1 ust. 2.
- [77] Wieloarkuszowa norma PN-EN 61557 *Bezpieczeństwo elektryczne w niskonapięciowych sieciach elektroenergetycznych o napięciach- przemiennych do 1kV i statycznych do 1,5kV*.
- [78] Wolski J.: *Przyrząd wirtualny do pomiaru impedancji pętli zwarciowej*. Praca dyplomowa pod kierunkiem R. Roskosza, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Gdańsk 2003.
- [79] Ziółko M.: *Nowa metoda pomiaru parametrów sieci elektroenergetycznych przy wykorzystaniu impedancyjnego obciążenia pomiarowego z regulowanym argumentem*. Rozprawa doktorska, promotor: Dariusz Świsulski ; Politechnika Gdańska 2008.
- [80] Katalog firmy Dacpol: *Podzespoły dla elektroenergetyki*, 2002.
- [81] Katalog firmy National Instruments, 2001.

# BADANIE METODY POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ WYKORZYSTUJĄCEJ SKŁADOWE FAZORA NAPIĘCIA

Metody do pomiaru impedancji pętli zwarciowej w układach elektroenergetycznych niskiego napięcia stale ewoluują i rozwijają się. Przyczyną tego jest fakt, iż pomiary te bezpośrednio związane są z bezpieczeństwem użytkowania urządzeń elektrycznych, jak również istnieją coraz większe możliwości techniczne pozwalające na rozwój metod i przyrządów do pomiarów impedancji pętli zwarciowej.

Metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej: metoda z przesunięciem  $\psi$  oraz metoda wektorowa to metody, w których impedancja pętli zwarciowej wyznaczana jest w oparciu o składowe ortogonalne fazora napięcia. Zaletami tych metod jest: eliminacja błędu fazowego (jednego z największych składowych błędów pomiaru impedancji pętli metodami klasycznymi) oraz możliwość zastosowania rezystancyjnego obciążenia pomiarowego, dzięki czemu miernik działający w oparciu o te metody charakteryzuje się małą masą i gabarytami.

Badaniom poddano dwie metody: z przesunięciem  $\psi$  oraz metodę wektorową. Celem tych badań była dogłębna analiza właściwości metrologicznych rozwiązań układowych, stosowanych w miernikach impedancji pętli zwarciowej z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym, z punktu widzenia realizowanych w nich procedur pomiarowych, oraz opracowanie i analiza metody do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej eliminującej wpływ impedancji źródła na wynik pomiaru.

Wyniki badań metody z przesunięciem  $\psi$  i metody wektorowej, pozwoliły sprecyzować zasady wyboru metody pomiarowej w zależności od parametrów sieci oraz opracować i zbudować fizyczny model miernika impedancji pętli zwarciowej realizujący obie metody. Przeprowadzone badania eksperymentalne modelu miernika potwierdziły wyniki uzyskane z symulacji komputerowych mówiące, że dokładność miernika działającego zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$ , jak i metodą wektorową związana jest głównie z błędem pomiaru napięcia, tolerancją wykonania obciążenia pomiarowego oraz dokładnością wyznaczenia przesunięcia między napięciami  $\psi$  w przypadku metody z przesunięciem  $\psi$ .

Efektem przeprowadzonych badań była budowa modelu miernika do pomiaru impedancji pętli zwarciowej działającego zgodnie z metodą z przesunięciem  $\psi$  i metodą wektorową, który w praktycznych warunkach przeprowadzenia pomiaru umożliwia pomiar impedancji pętli z błędem nieprzekraczającym 3%.

Na podstawie pomiaru wartości impedancji pętli zwarciowej oceniana jest skuteczność ochrony przeciwporażeniowej, dlatego też istotne jest wykorzystanie do pomiaru impedancji pętli miernika o wysokiej dokładności, ale równie istotne jest odpowiednie wywzorcowanie tych mierników. Znane układy i urządzenia do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej mają ograniczenia wynikające ze skończonej wartości impedancji wewnętrznej źródeł zasilania.

Przedstawiono sposób i układ umożliwiający dokładne wzorcowanie mierników impedancji, w których mierzoną impedancję wyznacza się na podstawie składowych ortogonalnych napięcia. Wyniki uzyskane z badań symulacyjnych i eksperymentalnych potwierdziły, że urządzenie to pozwala na wzorcowanie mierników impedancji pętli zwarciowej, eliminując wpływ impedancji źródła na wynik pomiaru. Błąd procesu wzorcowania, gdy rolę wzorca pełni rezystor normalny, nie przekracza 0,2%.

## RESEARCH ON THE METHOD OF MEASURING LOOP IMPEDANCE USING ORTHOGONAL VOLTAGE COMPONENTS

Methods of measuring loop impedance in electro energetic low-voltage power supplies are still developing and evolving. The reason for this is directly connected with safety of electrical system use and a growing number of new possibilities allowing the development of methods and meters for measuring loop impedance.

The methods analyzed in the research are: the shift  $\psi$  method and the vector method, in which the value of loop impedance is calculated on the basis of orthogonal voltage components.

The benefits of employing the two methods are the following: firstly, elimination of phase error, which is one of the biggest factor of the overall error in measuring loop impedance; secondly, a chance to use a resistance load meter, thanks to which a meter using the aforementioned methods is of little mass and size.

The objectives of the research were: a thorough analysis of the metrological properties of the two methods used in loop impedance meters with resistance load from the measuring viewpoint; as well as elaboration and analysis of the calibration method of loop impedance meters, which eliminates the influence of supply impedance on measurement results.

The results of the analysis of the shift  $\psi$  and vector methods have allowed to precise the rules of choice of the measurement method depending on network parameters, as well as to build the physical loop impedance meter adopting both methods.

The conducted experimental research of the model meter confirmed that the results obtained in computer simulations proved that the accuracy of the meter depends mainly on: a possible error in voltage measurement, tolerance of measurement load and accuracy in appointing the shift  $\psi$ , for the shift  $\psi$  method.

The research resulted in the construction of a model of a loop impedance meter involving the aforementioned methods, which allows measuring the value of loop impedance with an error of less than 3%.

The value of loop impedance allows for estimating the efficacy of protection against electric shock. Thus, it is very important to use a meter with high accuracy and to calibrate it. The existing systems and arrangements for calibration of loop impedance meters have limitations due to the internal impedance of power supplies.

The paper presents a manner and arrangement allowing for very accurate calibration of loop impedance meters, in which the impedance is calculated on the basis of orthogonal voltage components.

The obtained simulation and experiment results have confirmed that the device allows for calibration of loop impedance meters and elimination of the impact of internal impedance on measurement results. The error of the calibration process (based on the normal resistor) does not exceed 0,2%.