

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 fazora napięcia  $E$
- $E_c$  – składowa czynna fazora 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 fazora prądu przy zamkniętym łączniku W
- $I_{0c}$  – składowa czynna fazora prądu przy otwartym łączniku W
- $I_{0b}$  – składowa bierna fazora prądu przy otwartym łączniku W
- $I_{1b}$  – składowa bierna fazora 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. Sprawdzone 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. Sprawdzone 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.