

Politechnika Gdańska



Wydział Elektrotechniki
i Automatyki

Katedra Metrologii
i Systemów Informacyjnych

Rozprawa doktorska

mgr. inż. Anna Golijanek- Jędrzejczyk

*Badanie metody pomiaru impedancji pętli
zwarciowej wykorzystującej składowe
fazora napięcia*

Promotor:
dr hab. inż. Leon Swędrowski

Gdańsk, październik 2006

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	4
STRESZCZENIE	7
1. WPROWADZENIE	9
1.1. ZNACZENIE POMIARÓW IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ.....	9
2. CEL, ZAKRES I TEZY PRACY.....	12
2.1. CEL PRACY	12
2.2. TEZY PRACY	12
2.3. ZAKRES PRACY	12
3. PRZEGLĄD ZNANYCH METOD I MIERNIKÓW DO POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ	13
3.1. ZASADA POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ.....	13
3.2. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA DOKŁADNOŚĆ POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ..	16
3.2.1. Odształcenia napięcia	17
3.2.2. Obciążenia robocze sieci	19
3.2.3. Odchylenia i wahania napięcia.....	22
3.2.4. Stany przejściowe.....	23
3.2.5. Wpływ wartości prądu pomiarowego.....	24
3.2.6. Błąd fazowy.....	25
3.3. METODY POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ.....	27
3.3.1. Metoda stałoprądowa	27
3.3.2. Metoda techniczna z zastosowaniem własnego źródła zasilania	28
3.3.3. Metoda różnicowa	30
3.3.4. Metoda wektorowa z eliminacją wpływu obciążeń roboczych sieci	32
3.4. PODSUMOWANIE PRZEGLĄDU METOD POMIARU IMPEDANCJI.....	33
4. METODY POMIARU IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ OPARTE NA WYZNACZENIU SKŁADOWYCH ORTOGONALNYCH FAZORA NAPIĘCIA	34
4.1. METODA Z PRZESUNIĘCIEM ψ	34
4.2. METODA WEKTOROWA	37
4.3. ANALIZA METROLOGICZNA METODY Z PRZESUNIĘCIEM ψ	40
4.3.1. Źródła błędów wynikające z charakteru sieci i obwodu badanego	41
4.3.1.1. Odształcenie krzywej napięcia i parametry obwodu badanego.....	41
4.3.1.2. Obciążenie robocze sieci	45
4.3.2. Źródła błędów wynikające z parametrów miernika i stosowanej metody	48
4.3.2.1. Kąt fazowy badanej impedancji	49
4.3.2.2. Tolerancja wykonania rezystora obciążenia pomiarowego.....	49
4.3.2.3. Błąd pomiaru napięcia.....	49
4.3.2.4. Dokładność wyznaczenia okresu T mierzonego napięcia.....	53
4.3.2.5. Dokładność pomiaru przesunięcia τ pomiędzy mierzonymi napięciami	56
4.4. ANALIZA METROLOGICZNA METODY WEKTOROWEJ	59
4.4.1. Źródła błędów wynikające z charakteru obwodu badanego	61
4.4.1.1. Odształcenie krzywej napięcia i parametry obwodu badanego.....	61
4.4.1.2. Obciążenie robocze sieci	65
4.4.2. Źródła błędów wynikające z parametrów miernika i stosowanej metody	66
4.4.2.1 Kąt fazowy badanej impedancji	67
4.4.2.2. Tolerancja wykonania rezystora obciążenia pomiarowego.....	68
4.4.2.3. Błąd pomiaru napięcia.....	68
4.4.2.4 Dokładność wyznaczenia momentów czasowych.....	69

4.5. PODSUMOWANIE PRZEPROWADZONYCH ANALIZ METROLOGICZNYCH	70
5. FIZYCZNY MODEL MIERNIKA IMPEDANCJI PĘTLI	73
5.1. STRUKTURA MODELU MIERNIKA I OBIEKTU BADANEGO	73
5.1.1. Obiekt badany.....	73
5.1.2. Obciążenie pomiarowe	73
5.1.3. Układ pomiarowo-sterujący	74
5.2. BADANIA EKSPERYMENTALNE MODELU MIERNIKA IMPEDANCJI PĘTLI.....	79
5.3. PODSUMOWANIE BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH MIERNIKA.....	84
6. UKŁAD DO WZORCOWANIA MIERNIKÓW IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ ...	85
6.1. ZNANE UKŁADY DO WZORCOWANIA MIERNIKÓW IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ ..	85
6.2. MODYFIKACJE UKŁADU DO WZORCOWANIA MIERNIKÓW IMPEDANCJI PĘTLI	88
6.2.1. Sprawdzanie miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem ψ	92
6.2.2. Sprawdzanie miernika działającego w oparciu o metodę wektorową.....	93
6.3. ANALIZA METROLOGICZNA ZASTOSOWANEGO UKŁADU DO WZORCOWANIA MIERNIKÓW IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ	94
6.3.1. Źródła błędów przy wzorcowaniu miernika wyznaczającego impedancję metodą z przesunięciem ψ	95
6.3.1.1. Dokładność wykonania rezystorów R_0 i R_D	96
6.3.1.2. Tolerancja wykonania wzorca impedancji	97
6.3.1.3. Dokładność pomiaru napięcia	98
6.3.1.4. Dokładność wyznaczenia przesunięcia τ	100
6.3.1.5. Dokładność wyznaczenia okresu T napięcia.....	101
6.3.2. Źródła błędów przy wzorcowaniu miernika wyznaczającego impedancję metodą wektorową	101
6.3.2.1. Dokładność wykonania rezystorów R_0 i R_D	102
6.3.2.2. Tolerancja wykonania wzorca impedancji	104
6.3.2.3. Dokładność pomiaru napięcia	104
6.3.2.4. Dokładność wyznaczenia momentów czasowych.....	105
6.4. REALIZACJA FIZYCZNEGO UKŁADU DO WZORCOWANIA MIERNIKA IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ	106
6.5. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH UKŁADU DO WZORCOWANIA	110
6.6. PODSUMOWANIE BADAŃ SYMULACYJNYCH I EKSPERYMENTALNYCH UKŁADU DO WZORCOWANIA	112
6.6.1. Badania symulacyjne.....	112
6.6.2. Badania eksperymentalne.....	114
7. KONCEPCJA MIERNIKA IMPEDANCJI PĘTLI ZINTEGROWANEGO Z UKŁADEM DO WZORCOWANIA	115
8. PODSUMOWANIE, WNIOSKI KOŃCOWE I NAJWAŻNIEJSZE OSIĄGNIĘCIA	118
8.1. WNIOSKI KOŃCOWE	119
8.2. NAJWAŻNIEJSZE OSIĄGNIĘCIA AUTORKI	120
8.3. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ.....	120
9. LITERATURA	121
ZAŁĄCZNIK 1	125
ZAŁĄCZNIK 2	126
ZAŁĄCZNIK 3	129

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
\mathbb{L}_D	– łącznik tyrystorowy załączający obciążenie pomiarowe członu dopełniającego
\mathbb{L}_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_o	–	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_{ψ}	–	impedancja uzyskana metodą z przesunięciem ψ
Z_w	–	metoda uzyskana metodą wektorową
Z_{wz}	–	impedancja wzorcowa w układzie do wzorcowania pomiarowej
Z_S	–	impedancja obciążenia roboczego
α_n	–	kąt początkowy składowych harmonicznych
δZ_A	–	błąd impedancji pętli wynikający z charakteru sieci zasilającej, wyznaczony teoretycznie
δZ_B	–	błąd impedancji pętli wynikający z budowy miernika i metody, wyznaczony teoretycznie
δZ_C	–	całkowity błąd impedancji pętli, wyznaczony teoretycznie
δZ_m	–	błąd pomiaru impedancji pętli
δZ_{ϕ}	–	błąd fazowy pomiaru impedancji pętli
$\delta Z_{obciąż}$	–	błąd pomiaru impedancji pętli wynikający z sąsiedztwa obciążenia roboczego
δZ_{odch}	–	błąd pomiaru impedancji pętli wynikający z odchylenia krzywej napięcia
δZ_{odksz}	–	błąd pomiaru impedancji pętli wynikający z odkształcenia krzywej napięcia
δZ_{wah}	–	błąd pomiaru impedancji pętli wynikający z wahań krzywej napięcia
ΔE	–	błąd pomiaru napięcia w miejscu pomiaru przy otwartym łączniku W
ΔE_{odch}	–	odchylenie napięcia
ΔE_w	–	błąd pomiaru napięcia w miejscu pomiaru przy otwartym łączniku W, uwzględniany przy wyznaczeniu impedancji metodą wektorową
ΔE_{ψ}	–	błąd pomiaru napięcia w miejscu pomiaru przy otwartym łączniku W uwzględniany przy wyznaczeniu impedancji metodą z przesunięciem ψ

- ΔU_ψ – błąd pomiaru napięcia w miejscu pomiaru przy zamkniętym łączniku W, przy wyznaczeniu impedancji metodą z przesunięciem ψ
- ϕ – argument impedancji pętli zwarcia Z
- ϕ_0 – argument impedancji obciążenia pomiarowego Z_0
- ϕ_S – argument obciążenia roboczego Z_S
- λ – część ostatniego spróbkowanego okresu napięcia, $\lambda \in \langle 0,1 \rangle$
- τ – czas przesunięcia między napięciami $e(t)$ przed i $u(t)$ po załączeniu obciążenia pomiarowego R_0
- ω – pulsacja przebiegu o okresie T
- ψ – kąt fazowy obwodu badanego dla składowej podstawowej

Streszczenie

Rozprawa 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.

W pracy, 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 opartych na pomiarze składowych ortogonalnych napięcia, czyli metody z przesunięciem ψ 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 ψ (metoda ta dotychczas nie była implementowana praktycznie) jak i metodą wektorową.

Autorka rozprawy opracowała układ do wzorcowania mierników działających zgodnie z metodą z przesunięciem ψ oraz metodą wektorową. Przeprowadziła badania symulacyjne tego układu, a następnie zrealizowała układ w postaci fizycznej.

Rozdział pierwszy wprowadza w tematykę rozprawy z podkreśleniem znaczenia pomiarów impedancji pętli zwarciowej. Rozdział drugi zawiera cel, tezy i zakres pracy.

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 ψ oraz 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 ψ 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 rozprawy miernika wyznaczającego impedancję pętli obiema badanymi metodami. W rozdziale tym przedstawiono także wyniki badań eksperymentalnych tego miernika oraz dokonano weryfikacji rezultatów uzyskanych z doświadczenia z wynikami symulacji komputerowych z rozdziału czwartego. Uzyskano zbieżność wyników z eksperymentu z rezultatami rozważań teoretycznych.

W rozdziale szóstym przedstawiono problematykę wzorcowania mierników rezystancji i impedancji pętli, opisano stosowane układy do sprawdzania tych mierników oraz modyfikację układu opracowanego przez J. Sawickiego do wzorcowania mierników impedancji pętli, działających zgodnie z metodą z przesunięciem ψ i metodą wektorową.

Autorka rozdziale przeprowadziła w tym 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 ψ i metodą wektorową.

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

W rozdziale siódmym opisano ideę zintegrowanego miernika impedancji pętli zwarciowej, działającego zgodnie z metodą z przesunięciem ψ lub z metodą wektorową, wraz z układem do wzorcowania. W zaproponowanym układzie użytkownik ma możliwość samodzielnej, bieżącej kontroli zgodności parametrów metrologicznych miernika z poziomem gwarantowanym przez producenta.

Końcowa część rozprawy zawiera podsumowanie i wnioski końcowe.

1. 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, 70]. 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, 62].

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.

W pracy przedstawiono sposób i układ umożliwiający dokładne wzorcowanie mierników impedancji nawet o małym zakresie pomiarowym.

1.1. 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 zwarcie 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 120V prądu stałego lub 50V prądu przemiennego było wyłączone 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) lub urządzenia ochronne różnicowoprądowe (wyłączniki ochronne różnicowoprądowe, wyłączniki współpracujące z przekaźnikami 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]:

$$Z \leq \frac{U_o}{I_a} \quad (1.1)$$

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 50V [41], czyli:

$$R_A I_a \leq 50V \quad (1.2)$$

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]:

$$R_A I_d \leq 50V \quad (1.3)$$

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 zwymiarowania 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 szeregowo 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 instalacji elektroenergetycznej jest istotna również z punktu widzenia jakości energii elektrycznej [55, 65]. 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 może być konieczna znajomość wartości impedancji zasilania. Do wykonania filtra aktywnego niezbędna zaś będzie znajomość parametrów impedancji instalacji eklektycznej [65]. Dlatego informacja o parametrach impedancji zasilania sieci w instalacji elektrycznej jest tak bardzo ważnym czynnikiem.

2. Cel, zakres i tezy pracy

2.1. Cel pracy

Analiza właściwości metrologicznych rozwiązań układowych, stosowanych w miernikach impedancji pętli zwarciowej z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym, z punktu widzenia realizowanych w nich procedur pomiarowych. Analiza taka umożliwi sprecyzowanie zasad wyboru metody pomiarowej i skonstruowania miernika impedancji pętli zwarciowej, który będzie charakteryzował się mniejszymi błędami.

Opracowanie i analiza metody do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej eliminującej wpływ impedancji źródła na wynik pomiaru. Rozwiązanie problemu wymaga opracowania, wykonania i przeprowadzenia badań symulacyjnych i doświadczalnych urządzenia do wzorcowania mierników, w których mierzoną impedancję wyznacza się na podstawie składowych ortogonalnych napięcia.

2.2. Tezy pracy

Przeprowadzenie badań metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej (metody z przesunięciem ψ i metody wektorowej) wykorzystujących pomiar składowych ortogonalnych fazora napięcia, umożliwi sprecyzowanie zasad wyboru metody pomiarowej i pozwoli na zbudowanie miernika impedancji pętli zwarciowej o lepszych właściwościach metrologicznych niż dotychczas stosowane.

Wyniki badań dadzą również możliwości skonstruowania urządzenia do wzorcowania mierników impedancji pętli z eliminacją wpływu na wynik pomiaru impedancji źródła zasilania.

2.3. Zakres pracy

Zakres niniejszej rozprawy obejmuje realizację następujących zadań:

- studia literaturowe pod kątem krytycznej oceny znanych metod i mierników impedancji pętli,
- przeprowadzenie analizy wpływu czynników warunkujących dokładność mierników impedancji pętli zwarciowej z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym dla różnych warunków pomiaru,
- przeprowadzenie symulacyjnie analizy wrażliwości jednokierunkowej metody z przesunięciem ψ oraz metody wektorowej dla różnych warunków pomiaru,
- opracowanie i zbudowanie modelu fizycznego miernika oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych tego przyrządu, uwzględniających kształt krzywej napięcia sieci, parametry badanego obwodu oraz parametry modelu miernika,
- opracowanie procedury i układu o wzorcowania mierników impedancji pętli z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym oraz przebadanie fizycznego układu do wzorcowania.

3. Przegląd znanych metod i mierników do pomiaru impedancji pętli zwarciowej

W rozdziale tym zostały przedstawione wyniki studiów literaturowych przeprowadzonych przez autorkę rozprawy. Omówiono zasadę 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. Przedstawiono głównie metody z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym R_0 ze względu na fakt, iż metody, które mają zostać poddane analizie metrologicznej (metoda z przesunięciem ψ oraz metoda wektorowa) posiadają rezystancyjne obciążenie pomiarowe.

3.1. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej

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

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 . Impedancję Z określa zależność:

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

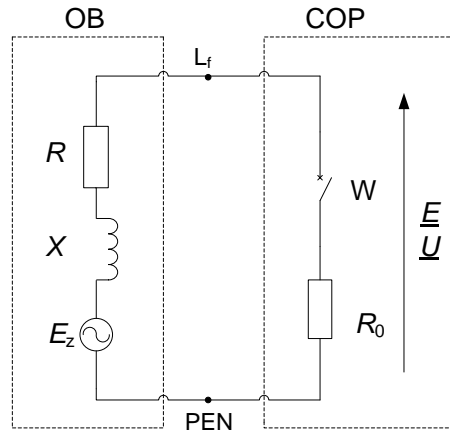
a jej składowe: rezystancyjna R i reaktancyjna X odpowiednio dane są wzorami:

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

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

gdzie: ϕ – argument pętli zwarcia, określonym 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 .



Rys. 3.1. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej Z [55]: OB – obiekt badany, COP – człon obciążenia pomiarowego

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 [55]:

- 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:

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

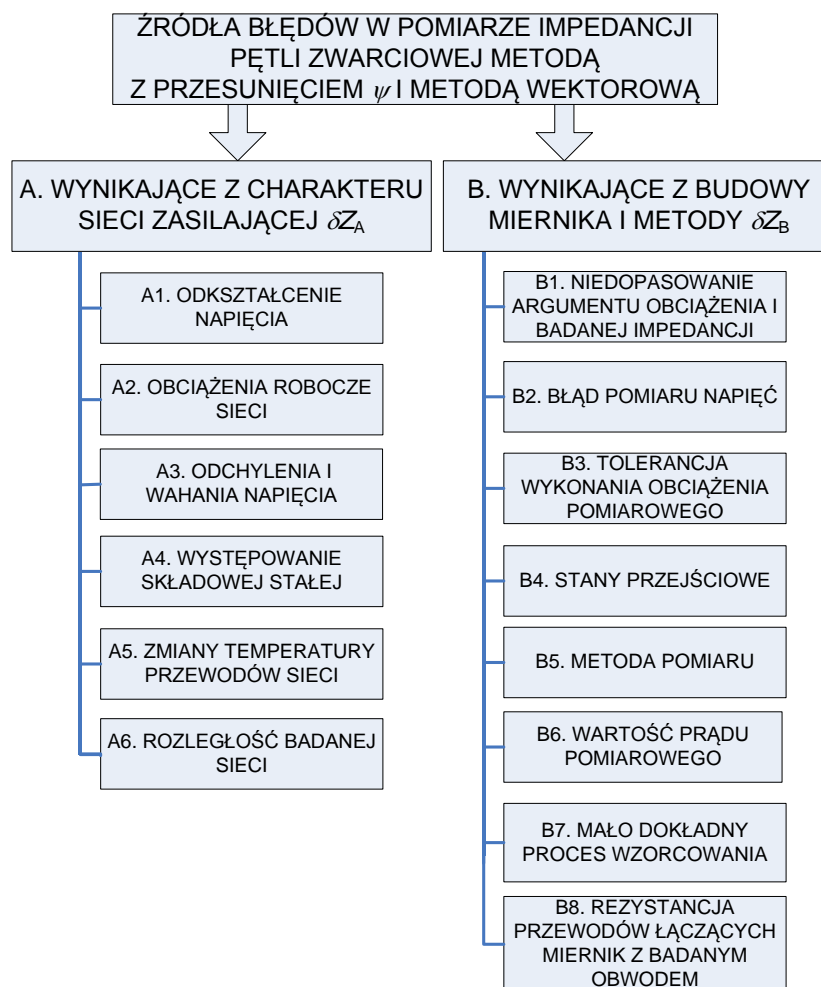
Występuje wówczas błąd pomiaru δZ_m obliczany ze znanego wzoru [55]:

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

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, 55, 61] (rys. 3.2).



Rys. 3.2. Czynniki wpływające na dokładność pomiaru impedancji pętli

W dalszej części pracy analizowany będzie wpływ na dokładność pomiaru impedancji pętli czynników wynikających z charakteru obwodu badanego: A1 i A2 (zgodnie z oznaczeniami przyjętymi na rysunku 3.2) oraz wynikających z budowy miernika i metody pomiaru, czyli od B1 do B6. Proces wzorcowania mierników impedancji pętli został opisany w rozdziale 6.

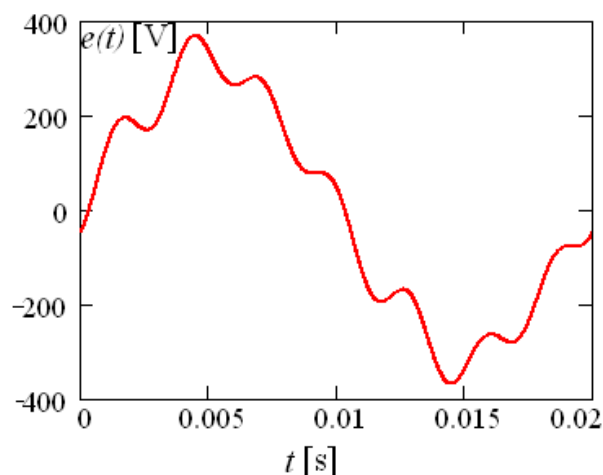
W pracy nie przeprowadza się analizy czynników od A3 do A6 i B8, ze względu na przyjęte założenia:

- 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 (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 odkształcony (rys. 3.1).



Rys. 3.3. Przykładowy przebieg krzywej odkształconej 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 indukują harmoniczne o następujących liczbach porządkowych: 5, 7, 9, 11, 13, 17, 19, 23, 25. Przekształtniki 12-pulsowe indukują 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 odkształcenia 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 zwarciowy w miejscu pomiaru przy sinusoidalnym napięciu ma mniejszą wartość niż prąd zwarciowy występujący w tym samym miejscu przy napięciu odkształconym.

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

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

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

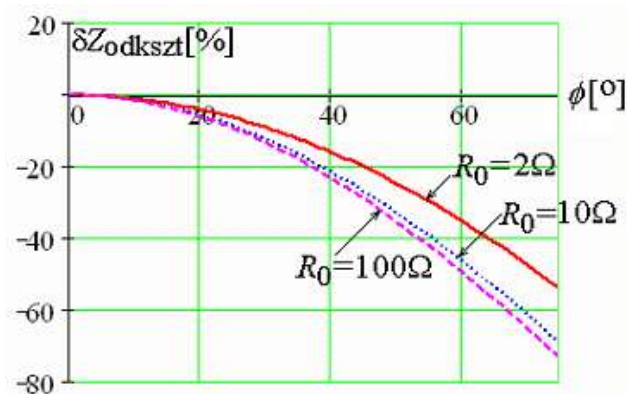
Tablica 3.1 Wartości poszczególnych harmonicznymi napięcia w złączu sieci elektroenergetycznej odbiorcy dla rzędów do 25, E_{zn} [%] [42]

nieparzyste harmonicznymi				parzyste harmonicznymi	
nie będące krotnością 3		będące krotnością 3			
rzęd n	względna wartość napięcia	rzęd n	względna wartość napięcia	rzęd n	względna wartość napięcia
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6...24	0,5%
13	3%	21	0,5%		
17	2%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

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

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

Na rysunku 3.4 przedstawiono wartości błędu δZ_{odksz} w funkcji argumentu pętli ϕ , dla różnych wartości prądu pomiarowego (przyjmując współczynnik odkształcenia napięcia na poziomie 8%).

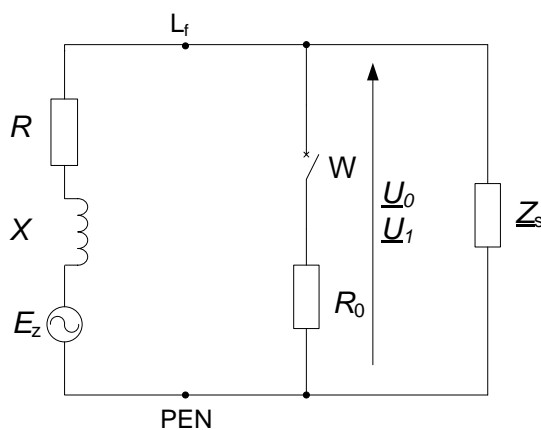


Rys. 3.4. Błąd $\delta Z_{\text{odksz}}=f(\phi)$ dla danych: $E_z=230\text{V}$, $Z=1\Omega$, $T=0,02\text{s}$, $R_0=2, 10, 100\Omega$, $a_3=0,03$, $a_5=0,02$, $a_7=0,01$, $a_9=0,0025$, $a_{11}=0,0075$, $a_{13}=0,01$, $\alpha_3=180^\circ$, $\alpha_5=0^\circ$, $\alpha_7=180^\circ$, $\alpha_9=\alpha_{11}=\alpha_{13}=0^\circ$

Jak widać, w przypadku pomiaru impedancji pętli metodami klasycznymi z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym błąd pomiaru impedancji δZ_{odksz} może znacznie przewyższać wartość dopuszczalną, która według przepisów [8, 75] nie powinna przekraczać $\pm 30\%$ (błąd według normy [75] rozumiany jako maksymalny błąd roboczy).

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 .



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 argumentie ϕ_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 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:

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

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

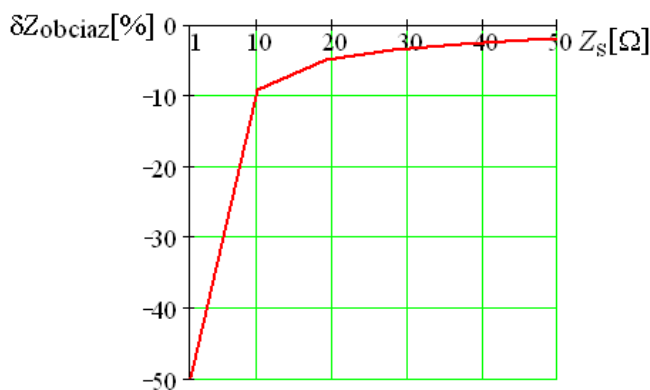
$$Z_{\text{obciąż}} = R_0 \frac{(U_0 - U_1)}{\left(U_1 - \frac{R_0}{Z_S} (U_0 - U_1) \right)} \quad (3.13)$$

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

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

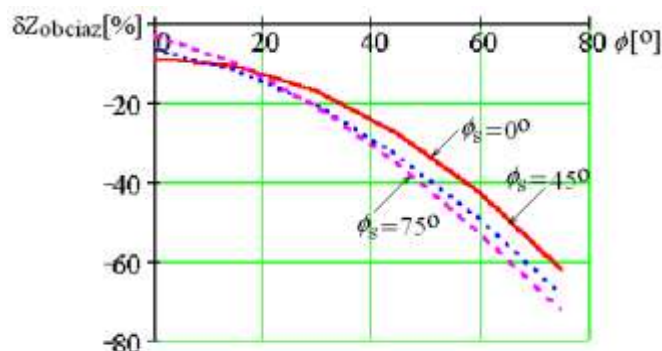
Błąd pomiaru impedancji pętli $\delta Z_{\text{obciąż}}$ spowodowany pracującym w sieci odbiornikiem ma zawsze znak ujemny, a jego wartość zależy od miejsca przyłączenia odbiornika oraz od wartości impedancji obciążenia roboczego Z_S . Jeśli chodzi o miejsce przyłączenia odbiornika to największe wartości błędów występują wówczas, gdy pomiary przeprowadzane są na zaciskach pracujących 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 $\delta Z_{\text{obci\u0105z}}$ może znacznie przekraczać wartość dopuszczalną przez przepisy [75] (rys. 3.6). Im większa wartość impedancji obciążenia roboczego Z_S , tym mniejszy błąd $\delta Z_{\text{obci\u0105z}}$ (wz\u00f3r (3.13)).



Rys. 3.6. Błąd $\delta Z_{\text{obci\u0105z}}=f(Z_S)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $E_z=230\text{V}$, $R_0=10\Omega$, $\phi=\phi_S=15^\circ$

Na rysunku 3.7 przedstawiono wykresy błędu $\delta Z_{\text{obci\u0105z}}=f(\phi)$, z których wynika, że błąd $\delta Z_{\text{obci\u0105z}}$ przyjmuje najmniejszą wartość, gdy $\phi=0^\circ$.



Rys. 3.7. Błąd $\delta Z_{\text{obci\u0105z}}=f(\phi)$ 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 miernik [5] wykorzystujący metodę wektorową z eliminacją wpływu obciążeń roboczych sieci opracowany przez S. Czappa [56] z Politechniki Gdańskiej.

3.2.3. Odchylenia i wahania napięcia

Zgodnie z [42]: „Odchylenie napięcia ΔE_{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”:

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

Odchylenia napięcia wywołane są spadkami napięć powstającymi w elementach sieci takich jak: transformatory, linie zasilające, dławiki i inne urządzenia elektroenergetyczne. Odchylenia napięcia mogą występować w sposób ciągły lub przejściowy – na przykład podczas rozruchu silnika klatkowego o dużej mocy.

Normy [42] ze względów technicznych dopuszczają różne, co do wartości i znaku odchylenia napięcia w zależności od rodzaju odbiornika. W przepisach podane są wartości dodatnie 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 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 [55]:

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

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

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

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

Natomiast impedancję pętli zwarciowej określa zależność:

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

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

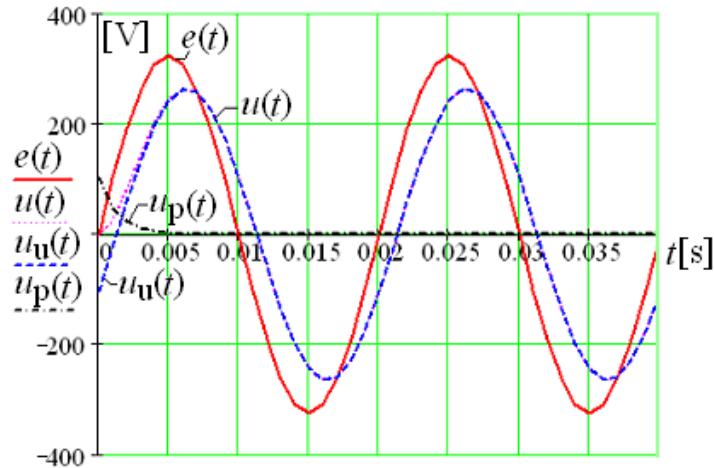
Wahania napięcia mogą być wywołane gwałtownymi zmianami obciążenia (praca tak zwanych odbiorników niespokojnych: spawarek, sprężarek tłokowych czy też rozruch silnika klatkowego, który pobiera wówczas prąd kilkakrotnie większy od znamionowego) lub zjawiskami zachodzącymi w samej sieci elektroenergetycznej (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:

- 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 rysunku 3.8.



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

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

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

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 wieloprądowych 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).

3.2.5. Wpływ wartości prądu pomiarowego

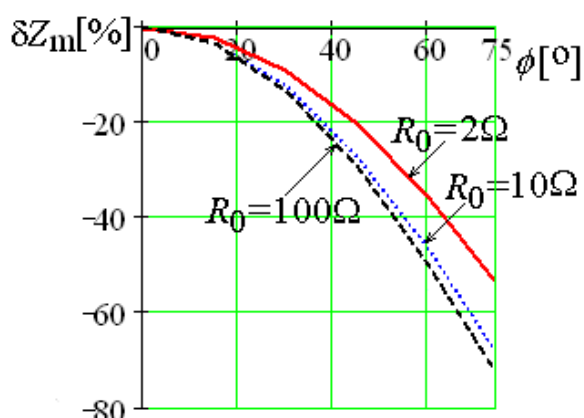
Obecnie w miernikach impedancji pętli zwarciowej stosuje się prąd pomiarowy o wartości od 10mA do 1kA [23, 50, 62].

Stosowanie dużego prądu pomiarowego jest korzystne, bowiem warunki pomiaru są zbliżone do zwarców 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 zadziałanie zabezpieczeń.

Mierniki z małym prądem pomiarowym powinny być stosowane w instalacjach elektrycznych z wyłącznikami różnicowoprądowymi. Zaletą małej wartości prądu pomiarowego jest możliwość wykrycia skorodowanych połączeń, których 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: $Z=1\Omega$, $E_z=230V$, $R_0=2, 10, 100\Omega$

Błąd pomiaru przyjmuje wartość równą zero w przypadku równości argumentów, czyli w przypadku stosowania rezystancyjnego obciążenia pomiarowego, gdy $\phi=0^\circ$, niezależnie od zastosowanego prądu pomiarowego.

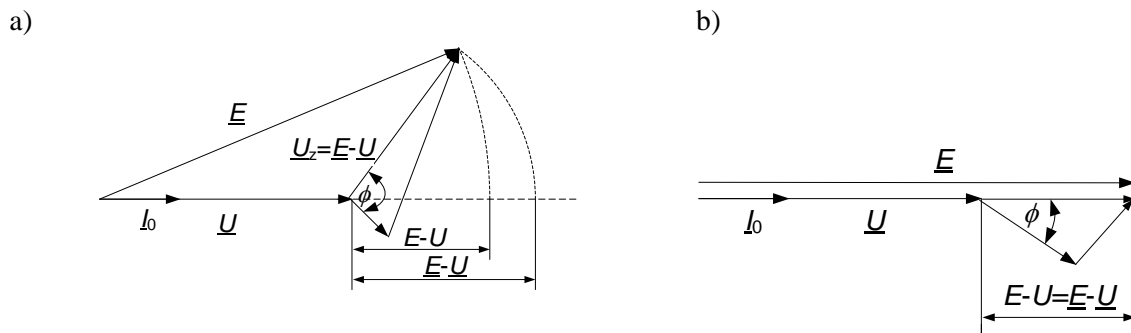
Oprócz wartości prądu pomiarowego istotne znaczenie ma również czas przepływu tego prądu. W trakcie konstruowania miernika należy zadbać o to, aby prąd pomiarowy przepływał w czasie będącym całkowitą wielokrotnością okresu napięcia (prąd półokresowy jest powodem powstania składowej stałej i wzmocnienia 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 δZ_ϕ spowodowany jest nieuwzględnieniem różnicy faz pomiędzy napięciami \underline{E} i \underline{U} (rys. 3.10). Błąd ten charakteryzuje następująca zależność [55]:

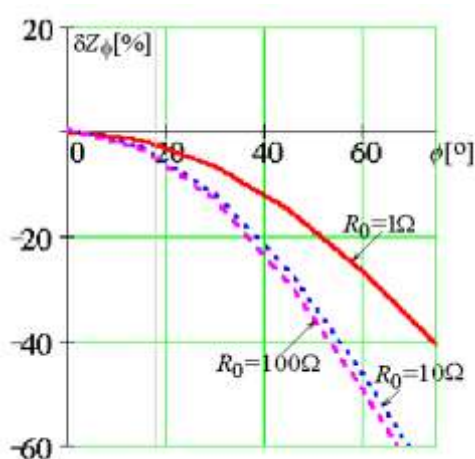
$$\delta Z_\phi = \frac{\sqrt{1 + S^2 + 2S \cos \phi} - 1}{S} - 1 \quad (3.21)$$

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



Rys. 3.10. Błąd δZ_ϕ spowodowany nieuwzględnieniem różnicy faz napięć E i U [55]: a) $\phi \neq \phi_0$, b) $\phi = \phi_0$

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 ϕ będzie równy kątowi fazowemu obciążenia pomiarowego ϕ_0 , czyli $\phi = \phi_0$. W przypadku stosowania rezystancyjnego obciążenia pomiarowego $\phi_0 = 0^\circ$, czyli dla $\phi \neq \phi_0$, występuje błąd fazowy δZ_ϕ , który może wynosić nawet 60% (rys. 3.11),



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

podczas gdy przepisy [8, 75] dopuszczają maksymalnie 30% błąd roboczy pomiaru impedancji pętli.

Błąd fazowy eliminowany jest w miernikach impedancji pętli wykorzystujących impedancyjne obciążenie pomiarowe z regulowanym argumentem [50].

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 (przemiennoprądowe i stałoprądowe),
- wartość prądu pomiarowego (małoprądowe $I < 1A$, średnioprądowe $1A \leq I \leq 20A$, wielkoprądowe $I > 50A$),
- rodzaj obciążenia pomiarowego (rezystancyjne: rezystancja R_0 , impedancyjne: rezystancja R_0 i reaktancja X_0 bądź impedancja Z_0 o regulowanym argumentcie ϕ_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 [64], Tagg z Anglii [68], Ter-Oganesjan z ZSRR [73].

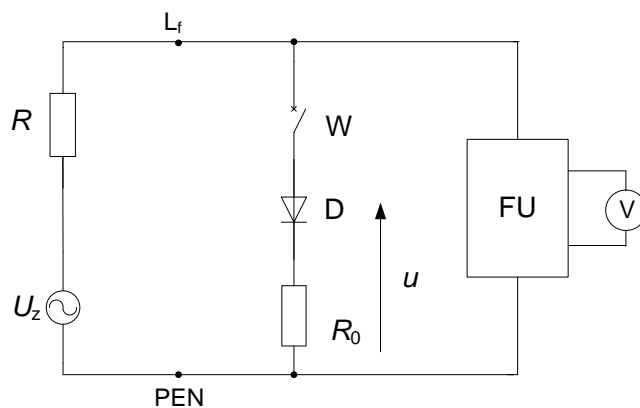
Badania w zakresie pomiarów impedancji pętli zwarciowej w Polsce były i są prowadzone głównie w dwóch ośrodkach: Politechnice Gdańskiej (Bielański [1], Iwicki [16-18], Musiał [27-31], Piasecki [45], Roskosz [4, 12-14, 17-18, 47-57, 59-60], Sawicki [17, 58-59], Swędrowski [47, 57, 60]), oraz Politechnice Wrocławskiej (Cegielski [3], Masny [23-25], Nawrocki [9-10, 32-40], Stafiniak [35, 38, 40, 61-63], Teresiak [23, 70-72]).

Ze względu na fakt, że będące tematem niniejszej rozprawy metody: z przesunięciem ψ i metoda wektorowa wykorzystują rezystancyjne obciążenia pomiarowe, w dalszej części pracy 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_f -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 pojawia się 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 sieci,
 U_{st} – składowa stała.

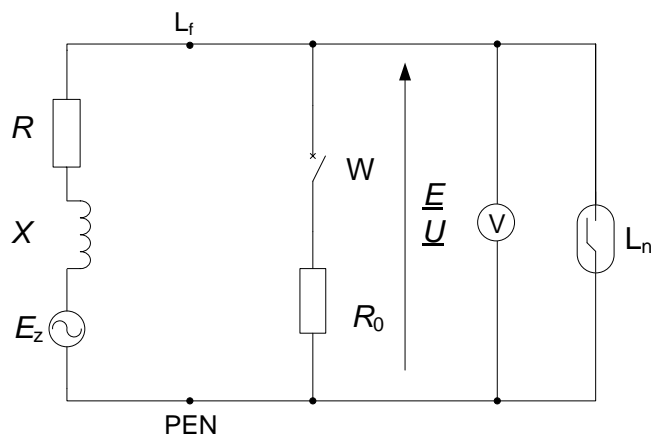
Cechą charakterystyczną metody stałoprądowej jest możliwość występowania dużych błędów pomiaru (rzędu nawet kilkunastu procent) spowodowanych odchyleniami napięcia czy też wpływem odbiorników roboczych (zwłaszcza jednofazowych o charakterze indukcyjnym). Przykładem takiego miernika jest Nulomet (firma „Metra” w CSRS).

Błąd spowodowany odchyleniami napięcia można ograniczyć wprowadzając odpowiednie współczynniki korekcyjne do wyników pomiarów, natomiast błąd spowodowany bocznującym 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 odchylen 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



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

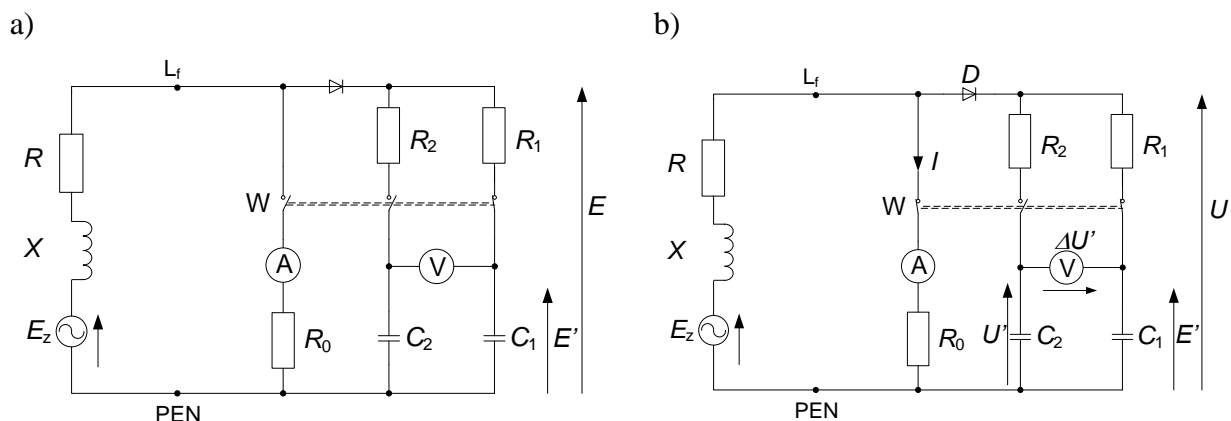
Sztuczne zwarcie w tym przyrządzie wykonuje się przez załączenie rezystancyjnego obciążenia pomiarowego R_0 . Po załączeniu R_0 wskazówka woltomierza (wyskalowanego w omach) odchyła się na skutek spadku napięcia wywołanego przepływem prądu pomiarowego, proporcjonalnie do wartości impedancji pętli zwarcia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



Rys. 3.15. Pomiar impedancji obwodu zwarciovego 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

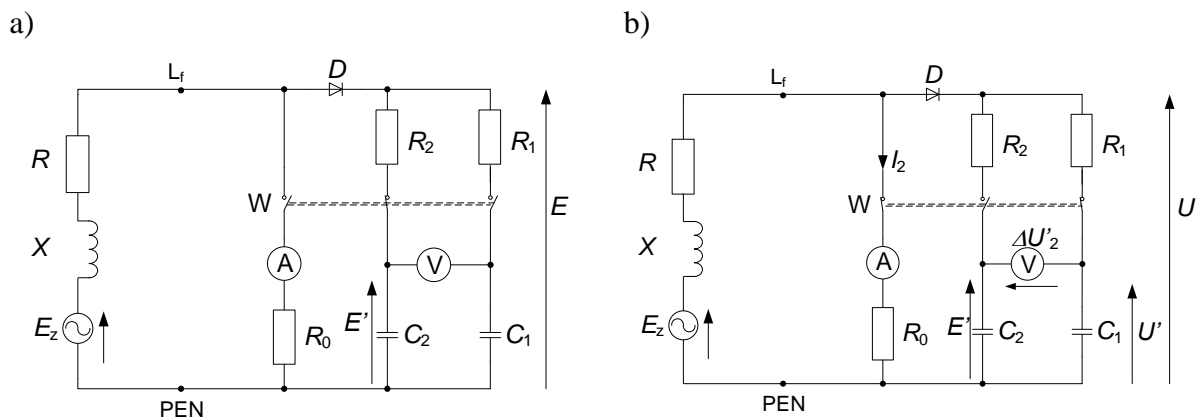
Pomiar odbywa się w dwóch cyklach pomiarowych. W pierwszym cyklu (rys. 3.15a) napięciem E ładowany jest kondensator C_1 , natomiast w drugim cyklu pomiarowym (rys. 3.15b) kondensator C_2 ładowany jest napięciem sztucznego zwarcia U oraz mierzony jest prąd I . Napięcia E' i U' występujące na kondensatorach C_1 i C_2 są odpowiednio proporcjonalne do napięć E i U . Woltomierz wskazuje różnicę napięć $\Delta U = E - U$. Natomiast impedancja pętli obwodu zwarciovego 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, 62, 63].

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 rysunku 3.16.



Rys. 3.16. Drugi cykl pomiaru impedancji pętli zwarciovowej 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 ΔU_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 zwarciovego 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 [62] 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 wyznaczane 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 mierzone jest napięcie sztucznego zwarcia I . Impedancję pętli w tej metodzie wyznacza się, jako:

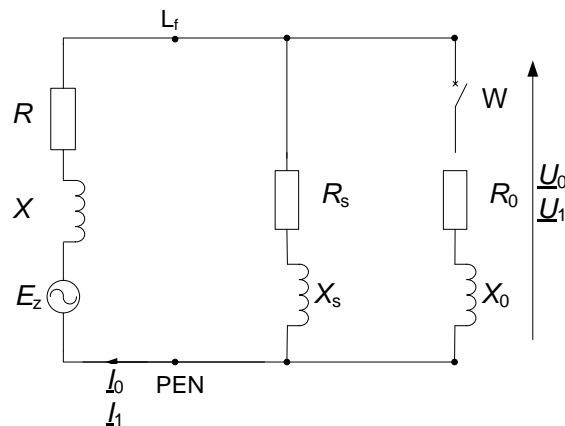
$$Z = \frac{\Delta U_1 - \Delta U_2}{I} \quad (3.27)$$

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, której współtwórcą jest autorka niniejszej rozprawy [56].

Wyznaczenie impedancji pętli tą metodą opiera się na pomiarze chwilowych wartości prądu i napięcia w układzie przedstawionym na rysunku 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 ϕ_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 $t_2 = t_1 + \frac{T}{4}$ 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 $t_4 = t_1 + \frac{T}{4} + kT$ 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:

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

Zaletą tej metody pomiarowej jest eliminacja błędu fazowego 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. Niestety, nie wiadomo, jaka jest dokładność pomiaru impedancji sieci, gdy w napięciu mierzonym występują wahania, odchylenia napięcia, czy też napięcie to jest odkształcone.

Znane są podstawy teoretyczne metod pomiaru impedancji pętli zwarcia: metody z przesunięciem ψ [4–12, 54] i metody wektorowej [51, 52, 55], 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

koniecznie przeprowadzić analizy metrologiczne metody z przesunięciem ψ i metody wektorowej, co jest pierwszym etapem niniejszej pracy.

4. Metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej oparte na wyznaczeniu składowych ortogonalnych fazora napięcia

W rozdziale czwartym przedstawione zostaną podstawy teoretyczne metody z przesunięciem ψ [4, 12, 54] i metody wektorowej [51, 52, 55]. Metody te umożliwiają dokładny pomiar impedancji pętli Z , w oparciu o składowe ortogonalne napięcia.

Zaprezentowane zostaną również wyniki analizy metrologicznej, przeprowadzonej przez autorkę rozprawy, dotyczące metody z przesunięciem ψ i metody wektorowej, która dla metody z przesunięciem ψ do tej pory nie została przeprowadzona. 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 wygaśnięcia stanów przejściowych.

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

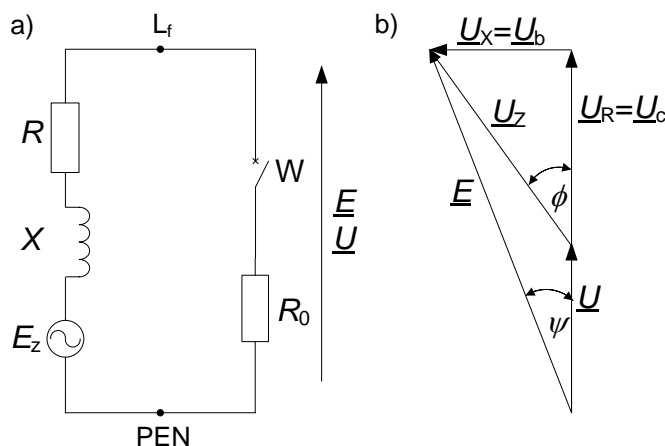
4.1. Metoda z przesunięciem ψ

Pomiar impedancji pętli zwarciowej Z oparty na zastosowaniu rezystancyjnego obciążenia pomiarowego R_0 przebiega zgodnie ze schematem na rysunku 4.1a [4, 12, 54].

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 ψ między fazorami napięć \underline{E} i \underline{U} .



Rys. 4.1. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej [13, 54]: a) schemat zastępczy obwodu badanego, b) wykres fazorowy napięć w badanym obwodzie

Zgodnie z wykresem fazorowym przedstawionym na rysunku 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 na impedancji U_Z^2 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 ψ , opisuje zależność:

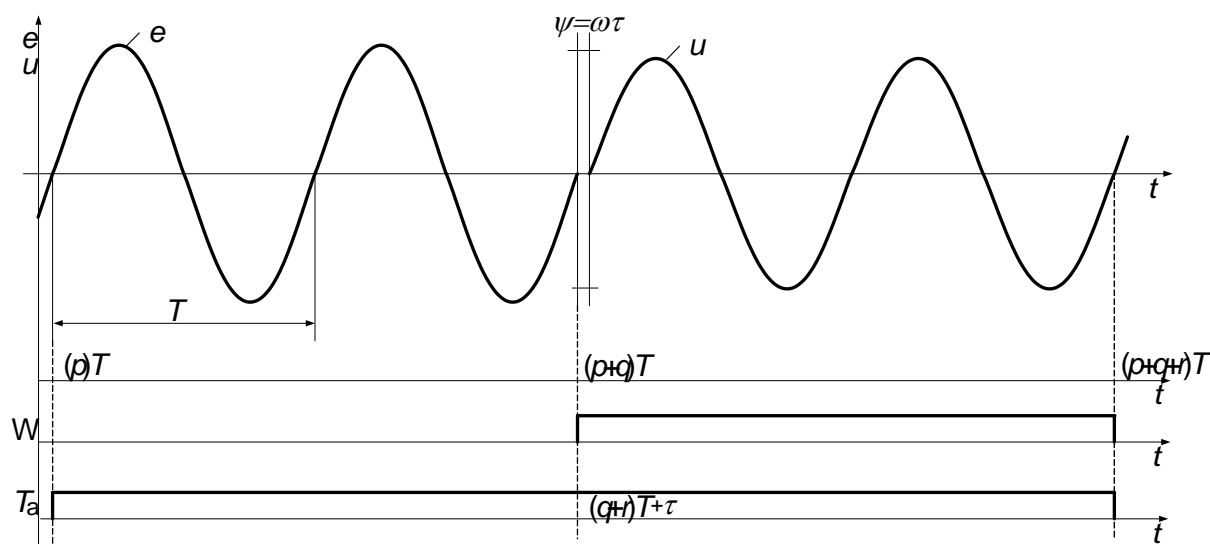
$$Z_\psi = R_0 \sqrt{\left(\frac{E}{U} - 1\right)^2 + 4 \frac{E}{U} \sin^2 \frac{\psi}{2}} \quad (4.7)$$

Wiedząc, że $\psi \rightarrow \tau$ i $2\pi \rightarrow T$, otrzymujemy $\frac{\psi}{2} = \pi \frac{\tau}{T}$. Przesunięcie czasowe τ , 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 – czas jaki mija między wybranymi przejściami przez zero napięcia $e(t)$ i $u(t)$.

W chwili załączenia wyłącznika W występuje stan przejściowy, który nie został zaznaczony na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Przebiegi mierzonych napięć i sygnałów sterujących

p, q, r – są liczbami naturalnymi.

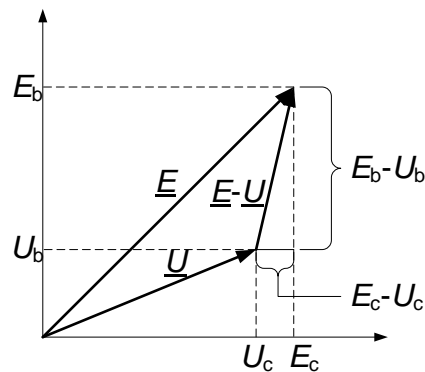
Wówczas zależność (4.7) ma postać:

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

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

4.2. Metoda wektorowa

Metoda wektorowa pomiaru impedancji pętli zwarciowej [51, 55] polega (zgodnie z rys. 4.1a) na pomiarze fazorów dwóch napięć, odpowiednio przed \underline{E} i \underline{U} po załączeniu rezystancyjnego obciążenia pomiarowego R_0 oraz wyznaczeniu składowych ortogonalnych tych dwóch napięć (rys. 4.3).

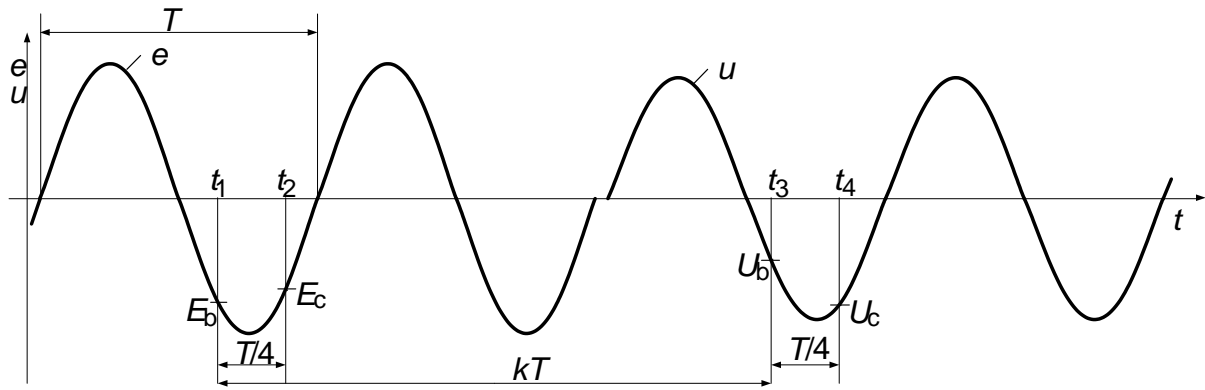


Rys. 4.3. Fazorowy wykres napięć przy pomiarze impedancji pętli zwarciowej [55]

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

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

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



Rys. 4.4. Krzywa napięcia z oznaczonymi chwilami pomiaru [55]

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

Fazor napięcia \underline{E} wyznaczony zostaje na podstawie dwóch chwilowych wartości nieobciążonego 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 $\frac{T}{4}$ w stosunku do pierwszej t_1 , czyli $t_2 = t_1 + \frac{T}{4}$:

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

Tę samą procedurę stosuje się przy określeniu fazona \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 wygaśnięcia stanów przejściowych wywołanych komutacją łącznika W.

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 $t_4 = t_1 + \frac{T}{4} + kT$ (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:

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

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

oraz moduł impedancji pętli zwarciowej:

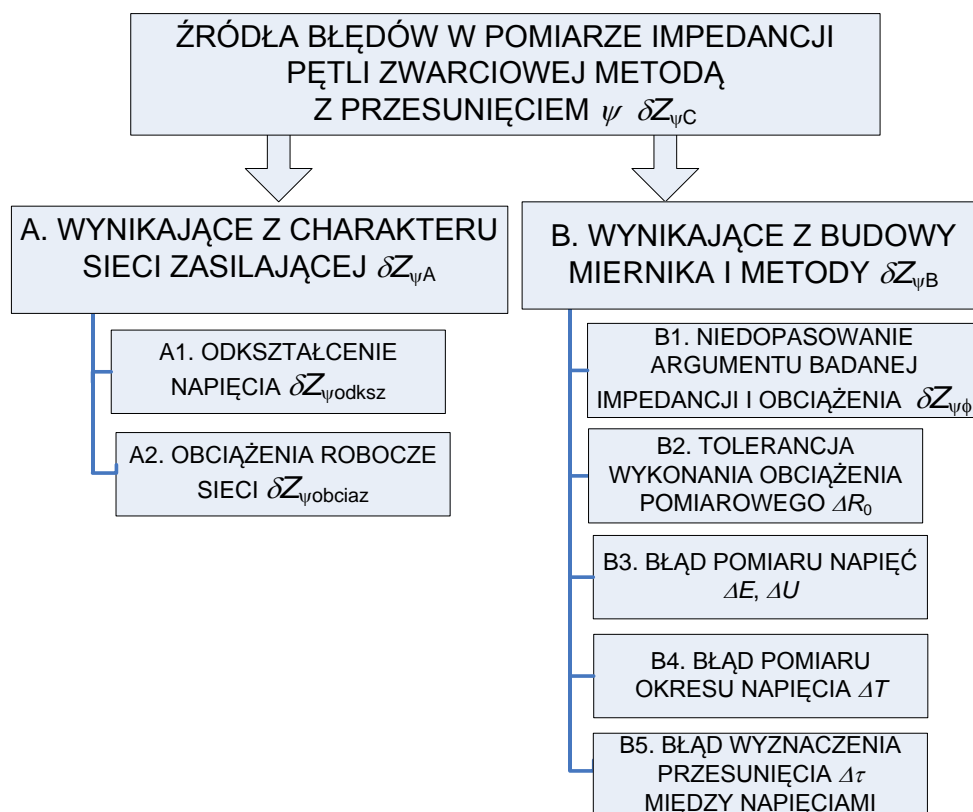
$$Z_w = R_0 \sqrt{\frac{(E_c - U_c)^2 + (E_b - U_b)^2}{U_c^2 + U_b^2}} \quad (4.18)$$

4.3. Analiza metrologiczna metody z przesunięciem ψ

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

Dlatego też w pracy przeprowadzono jednokierunkową analizę wrażliwości pozwalającą na ocenę kolejno i indywidualnie wpływu każdej wielkości wejściowej na dokładność 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 ψ .

Na rysunku 4.5 przedstawiono źródła błędów występujące podczas pomiaru impedancji pętli zwarciowej metodą z przesunięciem ψ . 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 ψ

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 δZ_A składają się czynniki A1 do A2 wymienione na rysunku 4.5. W tym wypadku przyjęto również, że każdy z czynników od A1 do A2 nie jest skorelowany i wówczas:

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

gdzie: błędy $\delta Z_{\psi \text{odks}}$, $\delta Z_{\psi \text{obc}}$ wyznaczane są z następujących zależności:

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

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 przez autorkę niniejszej rozprawy w programie MathCad. Podczas analiz założono, że występuje tylko jedno źródło błędu pomiaru impedancji pętli zwarciowej – to aktualnie analizowane, a inne błędy w tym czasie nie występują.

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. Odkształcenie 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 odkształcona i może być źródłem dodatkowego błędu pomiaru.

Dla przeprowadzenia analizy wpływu odkształcenia 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 α_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 odkształconym napięciu metodą z przesunięciem ψ 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 szukaną 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 τ między przebiegami napięcia.

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

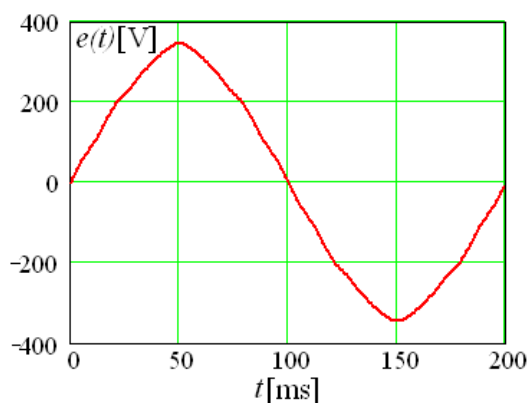
$$a_3=0,03, \quad a_5=0,02, \quad a_7=0,01, \quad a_9=0,0025, \quad a_{11}=0,0075, \quad a_{13}=0,01 \quad (4.25)$$

Udział poszczególnych harmonicznych przyjęto zgodnie z tablicą 4.1 oraz tak, aby współczynnik THD nie przekraczał 8% [42].

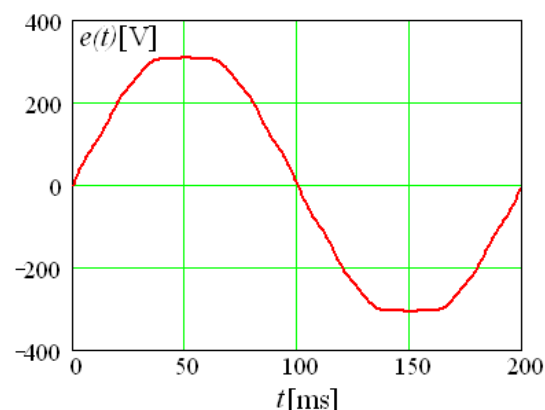
Analizy zostały wykonane dla trzech typów krzywych [55]:

a) krzywej wyostroznej $\alpha_3=180^\circ$, $\alpha_5=0^\circ$, $\alpha_7=180^\circ$, $\alpha_9=\alpha_{11}=\alpha_{13}=0^\circ$ (rys. 4.6),

b) 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),

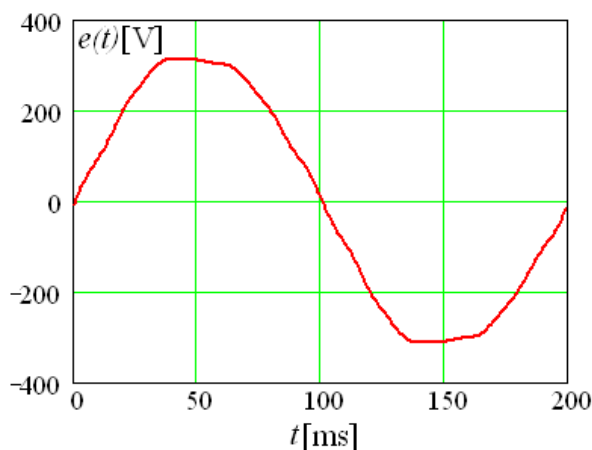


Rys. 4.6. Krzywa napięcia wyostrozna
 $a_3=0,03$, $a_5=0,02$, $a_7=0,01$, $a_9=0,0025$,
 $a_{11}=0,0075$, $a_{13}=0,01$,
 $\alpha_3=180^\circ$, $\alpha_5=0^\circ$, $\alpha_7=180^\circ$, $\alpha_9=\alpha_{11}=\alpha_{13}=0^\circ$



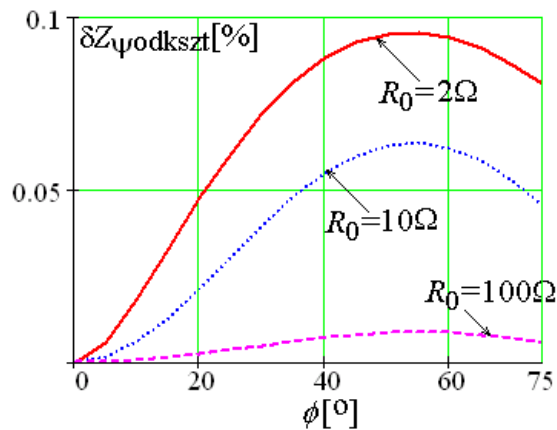
Rys. 4.7. Krzywa napięcia spłaszczona
 $a_3=0,03$ $a_5=0,02$ $a_7=0,01$ $a_9=0,0025$ $a_{11}=0,0075$
 $a_{13}=0,01$
 $\alpha_3=0^\circ$, $\alpha_5=180^\circ$, $\alpha_7=0^\circ$, $\alpha_9=\alpha_{11}=\alpha_{13}=0^\circ$

c) 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).



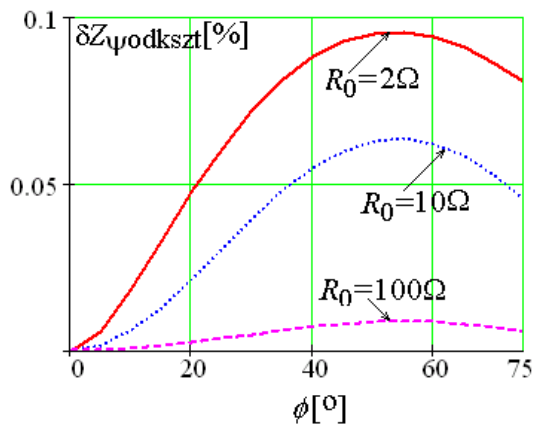
Rys. 4.8. Krzywa napięcia siodłowa
 $a_3=0,03$, $a_5=0,02$, $a_7=0,01$, $a_9=0,0025$, $a_{11}=0,0075$, $a_{13}=0,01$,
 $\alpha_3=-45^\circ$, $\alpha_5=180^\circ$, $\alpha_7=0^\circ$, $\alpha_9=\alpha_{11}=\alpha_{13}=0^\circ$

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 ψ , nie przekroczy 0,1%, gdy obciążenie pomiarowe R_0 będzie równe 2Ω (rys. 4.9), 0,7% dla $R_0=10\Omega$ i 0,009% dla $R_0=100\Omega$.

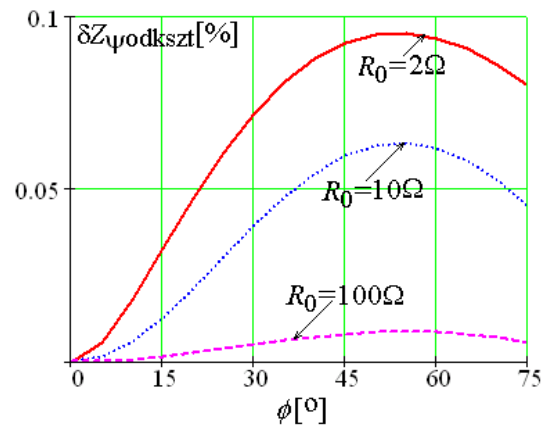


Rys. 4.9. Błąd $\delta Z_{\psi\text{odksz}}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $T=0,02\text{s}$, $R_0=2, 10, 100\Omega$,
 $a_3=0,03$, $a_5=0,02$, $a_7=0,01$, $a_9=0,0025$, $a_{11}=0,0075$, $a_{13}=0,01$,
 $\alpha_3=180^\circ$, $\alpha_5=0^\circ$, $\alpha_7=180^\circ$, $\alpha_9=\alpha_{11}=\alpha_{13}=0^\circ$

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



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



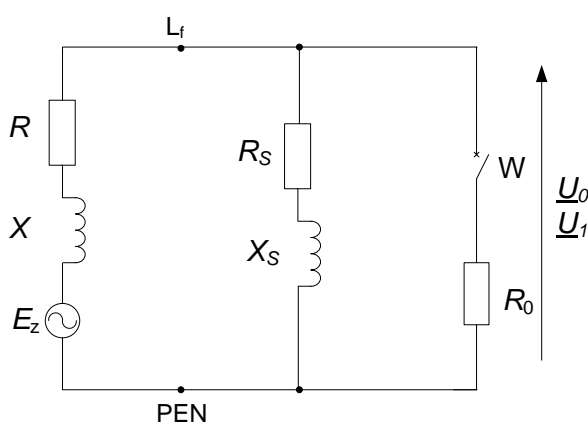
Rys. 4.11. Błąd $\delta Z_{\psi\text{odksz}}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$,
 $T=0,02\text{s}$, $R_0=1, 10, 100\Omega$, $a_3=0,03$, $a_5=0,02$,
 $a_7=0,01$, $a_9=0,0025$, $a_{11}=0,0075$, $a_{13}=0,01$,
 $\alpha_3=-45^\circ$, $\alpha_5=180^\circ$, $\alpha_7=0^\circ$, $\alpha_9=\alpha_{11}=\alpha_{13}=0^\circ$

Wpływ parametrów obwodu badanego na dokładność pomiaru impedancji pętli, czyli zależność od stosunku X/R oraz kąta fazowego ϕ impedancji Z , jest następujący: gdy pętla ma charakter rezystancyjny (pomiar w obwodach odbiorczych o małych przekrojach zlokalizowanych daleko od źródła zasilania), czyli ϕ bliskie 0° , wówczas wartość błędu od odkształceń $\delta Z_{\psi\text{odksz}}$ jest równa zero. Wraz ze wzrostem kąta ϕ 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 ψ , nie powinien przekroczyć 0,1%, niezależnie od kształtu mierzonej krzywej.

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 ψ , przeprowadzono dla układu jak na rysunku 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 ϕ_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 ϕ_{zast} opisują wzory:

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

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

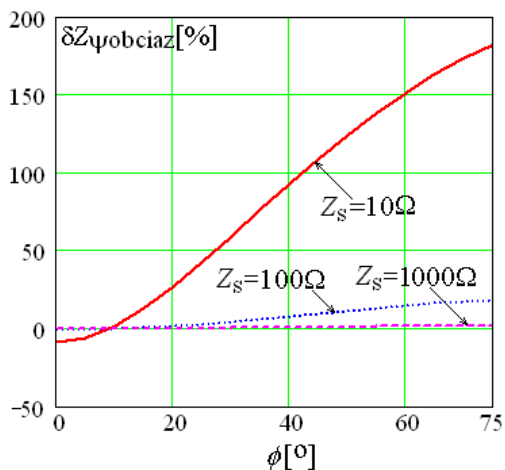
W celu wyznaczenia impedancji $Z_{\psi obci\alpha z}$ mierzonej w tym układzie zgodnie ze wzorem:

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

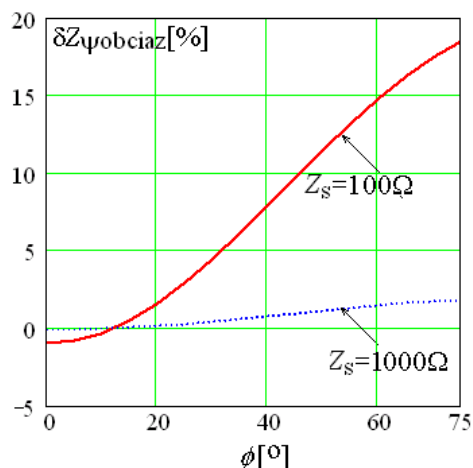
należy obliczyć wartości skuteczne napięć $u_0(t)$ i $u_1(t)$ oraz wyznaczyć kąt ψ pomiędzy napięciem $u_0(t)$ i $u_1(t)$ ze wzoru:

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

W przypadku gdy $Z_S = R_0$ wówczas błąd pomiaru $\delta Z_{\psi obci\alpha z}$ może przyjmować niedopuszczalnie duże wartości (rys. 4.13). Wtedy, o ile to możliwe, należy wyłączyć obciążenie robocze bądź też dokonać pomiaru w czasie, gdy jest ono wyłączone, albo wyizolować takie obciążenie robocze z układu pomiarowego.

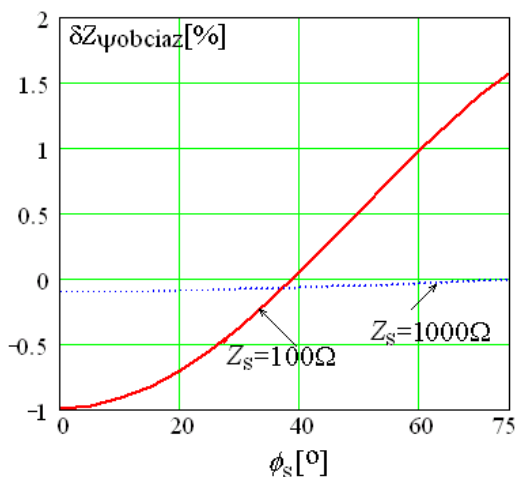


Rys. 4.13. Błąd $\delta Z_{\psi_{obciaz}}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $E_z=230V$, $R_0=10\Omega$, $\phi_s=0^\circ$, $Z_s=10, 100, 1000\Omega$

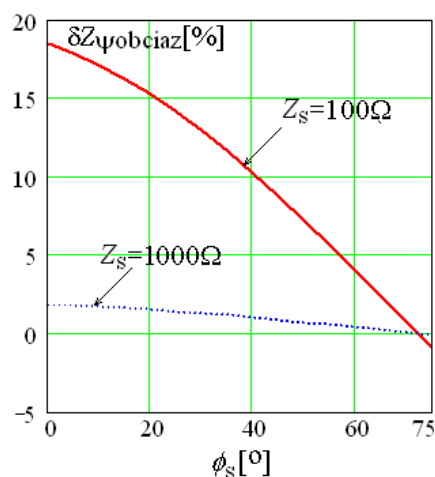


Rys. 4.14. Błąd $\delta Z_{\psi_{obciaz}}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $E_z=230V$, $R_0=10\Omega$, $\phi_s=0^\circ$, $Z_s=100, 1000\Omega$

Dla stosunku $R_0/Z_s=0,1$ błąd $\delta Z_{\psi_{obciaz}}$ nie przekracza 20% (rys. 4.14), natomiast gdy $R_0/Z_s=0,01$ błąd $\delta Z_{\psi_{obciaz}}$ nie osiąga 2,5%.



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



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

Błąd mniejsze wartości przyjmuje 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 δZ_A przejęto, że $\delta Z_{\psi_{obciaz}}$ nie przekroczy 1,6% (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 ϕ i ϕ_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, 69] bezwzględny błąd pomiaru ΔZ_{ψ} został zdefiniowano następująco:

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

gdzie:

- ΔR_0 – tolerancja wykonania rezystancji obciążenia pomiarowego sprawdzanego przyrzędu,
- ΔE , ΔU – błąd pomiaru napięcia odpowiednio przed i po załączeniu obciążenia pomiarowego R_0 ,
- $\Delta \tau$ – błąd pomiaru przesunięcia między zmierzonymi napięciami,
- ΔT – 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 ψ 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 ψ między tymi napięciami, który to kąt umożliwia wyznaczenie składowych ortogonalnych U_R i U_X fazora różnicy napięć \underline{U}_z (rys. 4.1a). Efekt jest taki, jakbyśmy dokonywali pomiaru impedancji pętli metodą klasyczną zgodnie z zależnością zespoloną (zależność (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 10Ω wykonany jest z dokładnością 0,01, 0,05, 0,1%.

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

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

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

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

gdzie: δk to procent napięcia wejściowego E_{in} , wartość podawana 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 [76] i zestawione w tabelicy 4.1.

Tablica 4.1. Błąd całkowity przykładowych przetworników LEM [76]

Lp.	Typ przetwornika	Całkowity błąd pomiaru δk [%]	E_{in} [V]	ΔE_{przetw} [V]
1	LV-20-P	± 1	230	2,3
2	LV25-P	$\pm 0,8$		1,84
3	CV-500	$\pm 0,2$		0,46

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

Wartość całkowitego błędu ΔE_{DAQ} pomiaru napięcia kartą pomiarową z uwzględnieniem wszystkich wymienionych czynników charakteryzuje następująca zależność [77]:

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

Założono zakres zmian temperatury w przedziale $+15^{\circ}\text{C}$ do 35°C , a w nim zgodnie z informacją od producenta błąd zwany dryftem temperaturowym uwzględniony jest już w błędzie przesunięcia zera δE_{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 ΔE_{DAQ} tymi kartami pomiarowymi dla tych samych warunków obliczono zgodnie ze wzorem (4.40), a wyniki zestawiono w tabelicy 4.2.

Tablica 4.2 Błąd pomiaru napięcia ΔE_{DAQ} oraz jego składowe dla przykładowych kart firmy NI, dla $E_{inDAQ}=5\text{V}$ [77]

Lp.	Typ DAQ	$\delta E_{\%R}$ [%]	ΔE_{offset} [mV]	$\Delta E_{noise+quant}$ [mV]	ΔE_{DAQ} [mV]
1	6021	0,021	3,2	1,733	5,9
2	6024	0,0314	3,2	1,95	6,7
3	6032	0,0361	0,244	0,317	2,4

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

W przypadku gdy napięcie ma sinusoidalny kształt, błąd ΔE_{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 ΔE_{sk} przyjmuje wartość równą 0 dla $\lambda=0,25, 0,5, 0,75, 1$. Natomiast maksymalną wartość ΔE_{sk} przyjmuje dla $\lambda=0,375$ i dla $M=6, \alpha=0^\circ, E=5V$, a wynosi ona $\Delta E_{sk}=15mV$.

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

Błąd pomiaru napięcia ΔE_{ψ} przeliczony do wejścia układu, dla najmniej korzystnego przypadku [41, 69], można wyznaczyć z następującej zależności:

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

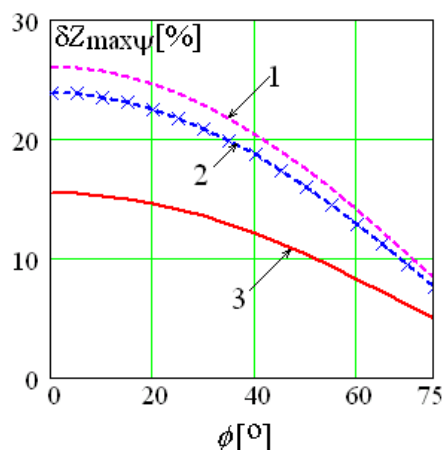
gdzie: k_u – wzmacnienie przetwornika napięcia.

Tablica 4.3 Błąd pomiaru napięcia ΔE dla przykładowych przetworników i kart pomiarowych

Lp.	Przetwornik LEM	k_u	Typ DAQ	ΔE_{przetw} [V]	ΔE_{DAQ} [mV]	ΔE_{sk} [mV]	ΔE_{ψ} [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
7.	CV-500	50	6021	0,46	5,9		1,50
8.			6024		6,7		1,54
9.			6032		2,4		1,33
10.	LV-20-P	66	6021	2,3	5,9	13 krzywa odkształcona	3,56
11.			6024		6,7		3,61
12.			6032		2,4		3,33
13.	LV25		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

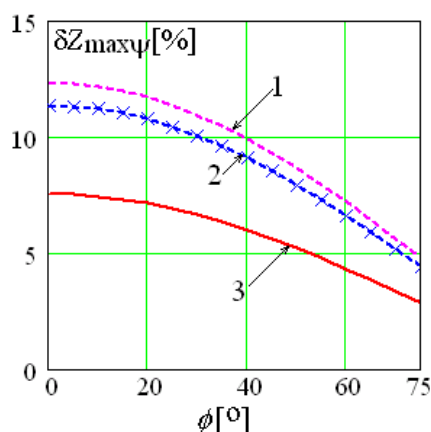
Na podstawie danych zamieszczonych w tablicy 4.3 widać, że najbardziej znaczącą składową błędu pomiaru napięcia ΔE_{ψ} jest błąd przetwornika ΔE_{przetw} oraz że bezcelowe jest zastosowanie przetworników a/c o rozdzielczości ponad 12-bitowej, bowiem błąd ΔE_{DAQ} dla kart 12-bitowych jest o 3 rzędy mniejszy od błędu przetwornika ΔE_{przetw} . Dlatego w dalszych rozważaniach uwzględniona zostanie karta pomiarowa firmy National Instruments typu 6024E.

Z rysunku 4.17 widać, że metoda ta jest bardzo wrażliwa na dokładność wyznaczenia napięć i że przy stosunku pomiarowym $Z/R_0=0,1$ błąd $\delta Z_{\text{max}\psi}$ 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 $\delta Z_{\text{max}\psi}$ przyjmuje także dużą wartość, gdy rolę przetwornika napięcia będzie pełnił przetwornik CV-500, $\delta Z_{\text{max}\psi}=16\%$.



Rys. 4.17. Błąd $\delta Z_{\max\psi}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$, $\Delta U_\psi=1,54V$,
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 ϕ dla $Z/R_0=0,25$.

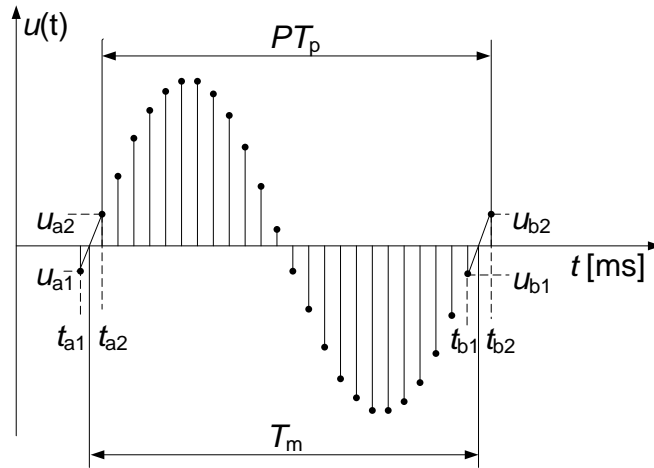


Rys. 4.18. Błąd $\delta Z_{\max\psi}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $R_0=4\Omega$, $\Delta U_\psi=1,54V$,
1-LV20-P, 2-LV25P, 3-CV-500

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 spróbkowania mierzonego sygnału z zadaną częstotliwością $f_p = \frac{1}{T_p}$.



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]:

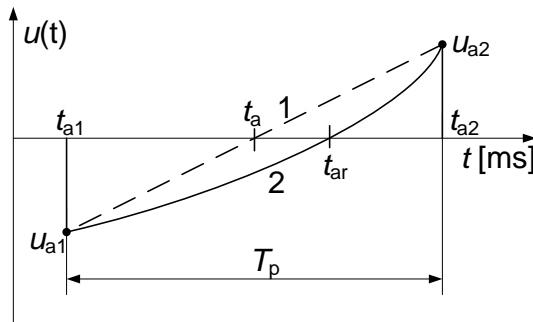
$$T_m = P \cdot T_p + t_{a2} - t_{b2} \quad (4.43)$$

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 $\frac{T_m}{T_p}$ 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:

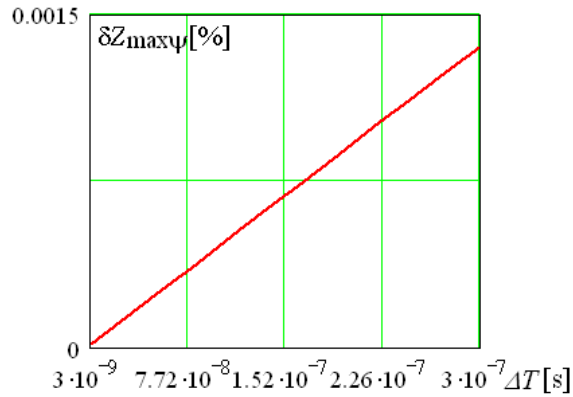
$$\delta T_m = 2 \cdot \left(\frac{t_{ar} - t_a}{T_p} \right) \cdot 100 \quad (4.46)$$

Błąd δT_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 $0,75T_p$ [66].

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

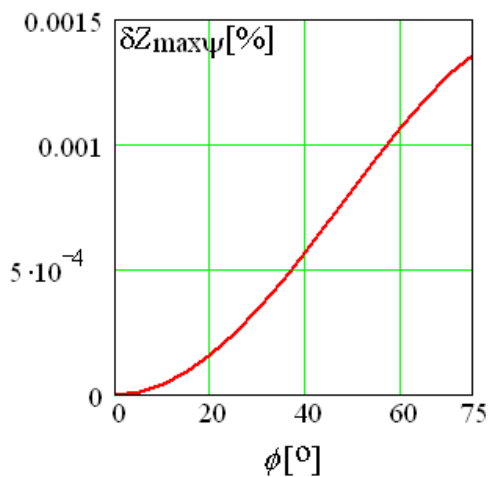
Uwzględniając ten fakt i przyjmując $T_p = 0,5\mu s$ (400 próbek na okres napięcia), $\Delta E_{DAQ} = 2mV$, otrzymujemy dla sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 50Hz błąd pomiaru okresu metodą aproksymacyjną równy $\Delta T = 3ns$, natomiast w przypadku odkształcenia krzywej napięcia (przyjmując 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 ΔT w przedziale od $0,003\mu s$ do $0,3\mu s$. Rysunek 4.21 przedstawia błąd wyznaczenia impedancji pętli zwarcia w zależności od niedokładności pomiaru okresu.

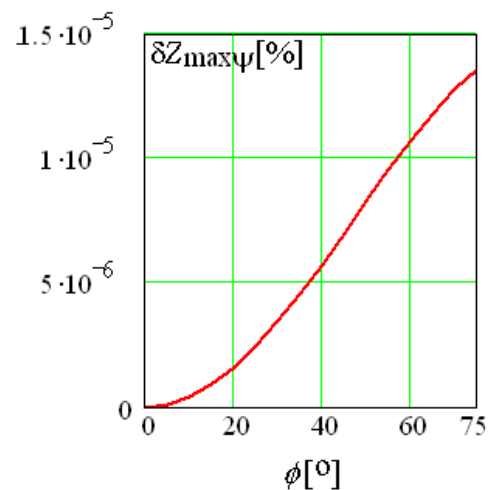


Rys. 4.21. Błąd $\delta Z_{\max\psi}=f(\Delta T)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$, $\phi=75^\circ$

Błąd pomiaru okresu ΔT 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: $Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$, $\Delta T=0,3\mu\text{s}$

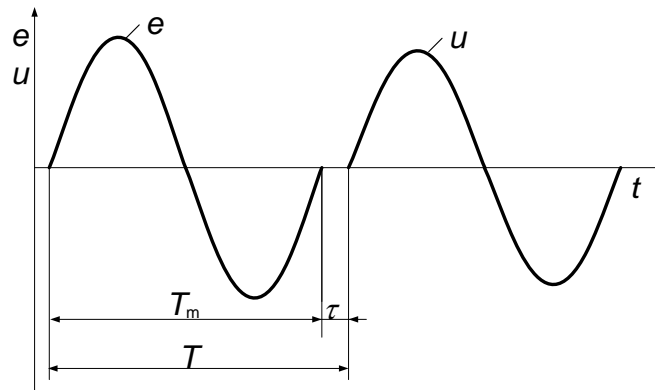


Rys. 4.23. Błąd $\delta Z_{\max\psi}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$, $\Delta T=0,003\mu\text{s}$

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 τ pomiędzy mierzonymi napięciami

Zgodnie z rysunkiem 4.24 wielkościami zmierzonymi są: T_m – okres napięcia, τ – przesunięcie fazowe po załączeniu obciążenia pomiarowego oraz T – okres napięcia uwzględniający przesunięcie fazowe.



Rys. 4.24. Przebieg zmierzonego sygnału

Przesunięcie fazowe τ określa zależność:

$$\tau = T - T_m \quad (4.47)$$

gdzie:

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

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

T' , T'_m – rzeczywista wartość okresu T oraz T_m ,
 ΔT_1 , ΔT_2 – błędy bezwzględne pomiaru okresu T ,
 ΔT_{m1} , ΔT_{m2} – błędy bezwzględne pomiaru okresu T_m .

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

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

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 oraz przesunięcie τ , zgodnie ze wzorami (4.47) i (4.48), przyjmuje wartość maksymalną, gdy:

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

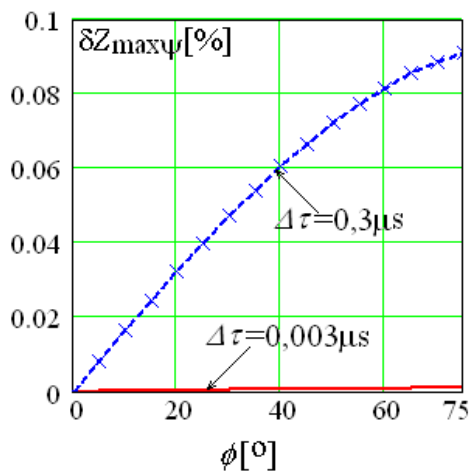
$$\tau = \tau' \pm \Delta T_2 \mp \Delta T_{m2} \stackrel{\Delta T_2 = -\Delta T_{m2} = \Delta T}{=} \tau' + 2 \Delta T' \quad (4.54)$$

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

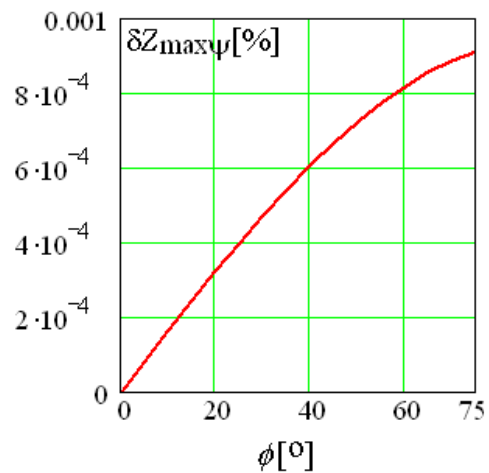
$$\tau - \tau' = T - T' \Rightarrow \Delta \tau = \Delta T \quad (4.55)$$

co dowodzi faktu, że błąd bezwzględny pomiaru przesunięcia fazowego $\Delta \tau$ oraz błąd bezwzględny pomiaru okresu napięcia ΔT są sobie równe. Uwzględniając ten fakt oraz wyniki analiz przeprowadzonych w poprzednim podrozdziale, zgodnie z którymi $\Delta \tau$ należy do przedziału $\langle 0,003\mu s, 0,3\mu s \rangle$, 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).

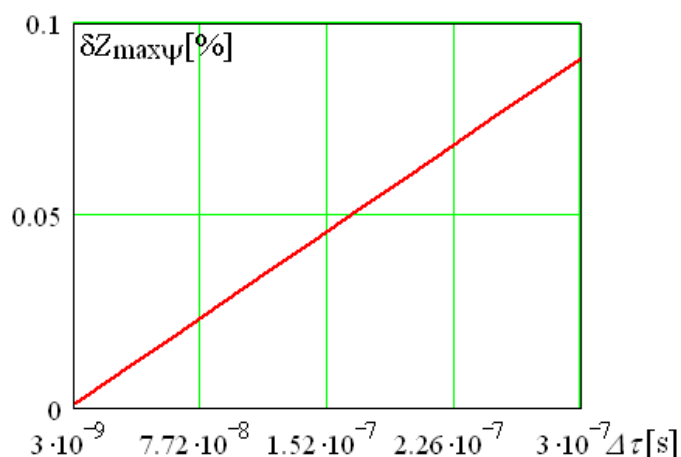


Rys. 4.25. Błąd $\delta Z_{\max\psi} = f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$, $\Delta \tau=0,003, 0,3\mu s$



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

Metoda z przesunięciem ψ pomiaru impedancji pętli zwarcia jest bardziej wrażliwa na niedokładność wyznaczenia przesunięcia między napięciami $\Delta \tau$ niż na niedokładność pomiaru okresu ΔT . Fakt ten potwierdza rysunek 4.27, na którym widać, że dla przyjętych danych błąd $\delta Z_{\max\psi}(\Delta \tau)$ nie przekracza 0,1%,



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

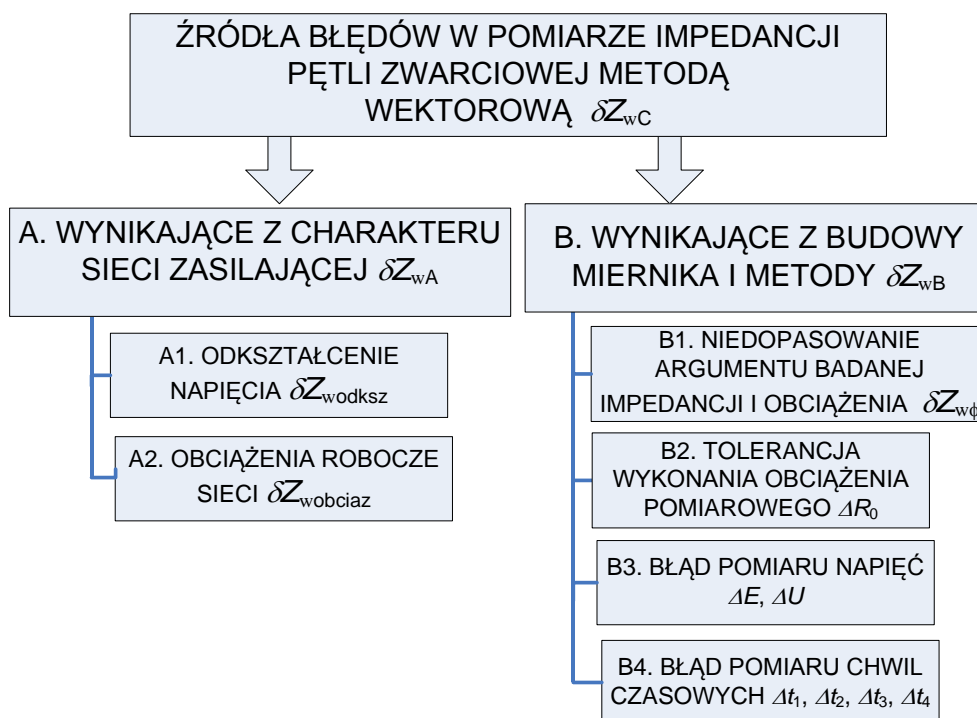
dla tych samych danych $\delta Z_{\max\psi}(\Delta T)$ nie przekracza 0,0015% (rys. 4.21).

4.4. Analiza metrologiczna metody wektorowej

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

Autorka rozprawy przeprowadziła jednokierunkową analizę wrażliwości umożliwiającą kolejno i indywidualnie ocenić wpływ 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 wektorową.

Na rysunku 4.28 przedstawiono źródła błędów występujące podczas pomiaru impedancji pętli zwarciowej metodą wektorową. W dalszej 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 zwarciowej metodą wektorową

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

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

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

$$\delta Z_{wA} = |\delta Z_{wodkszc}| + |\delta Z_{wobciacz}| \quad (4.57)$$

gdzie: błędy $\delta Z_{wodkszc}$, $\delta Z_{wobciacz}$ wyznaczane są z następujących zależności:

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

Natomiast błąd δZ_{WB} 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 przez autorkę niniejszej rozprawy w programie MathCad. Podczas analiz założono, że występuje tylko jedno źródło błędu pomiaru impedancji pętli zwarciowej – to aktualnie analizowane, a inne błędy w tym czasie nie występują.

4.4.1. Źródła błędów wynikające z charakteru obwodu badanego

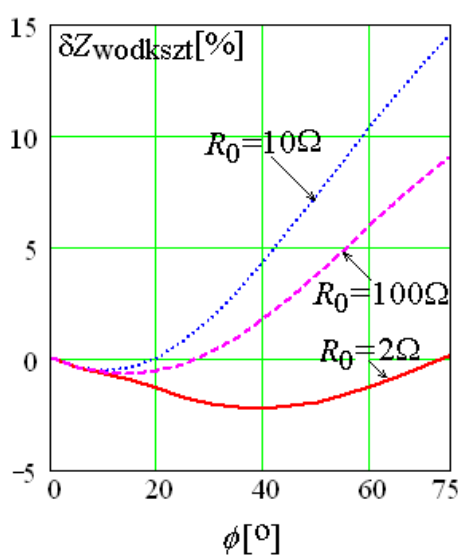
W celu określenia wrażliwości metody wektorowej na różne czynniki wynikające z charakteru obwodu badanego skorzystano ze wzorów (4.60). W indeksie każdego z tych wzorów dodajno literę w – oznaczając tym samym, że wartość impedancji została wyznaczona metodą wektorową.

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

4.4.1.1. Odkształcenie krzywej napięcia i parametry obwodu badanego

Do analiz przyjęto, tak samo jak w przypadku miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem ψ , 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: wyostrozonej, spłaszczonej i siodłowej.

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

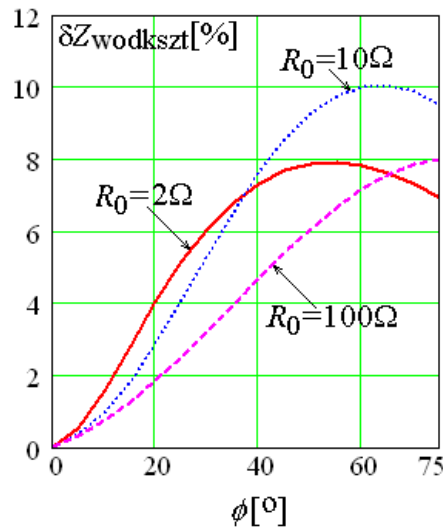


Rys. 4.29 .Błąd $\delta Z_{wodksz}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega$, $E_z=230V$, $R_0=1, 10, 100\Omega$, $a_3=0,03$, $a_5=0,02$, $a_7=0,01$, $a_9=0,0025$, $a_{11}=0,0075$, $a_{13}=0,01$,

$$\alpha_3=180^\circ, \alpha_5=0^\circ, \alpha_7=180^\circ, \alpha_9=\alpha_{11}=\alpha_{13}=0^\circ$$

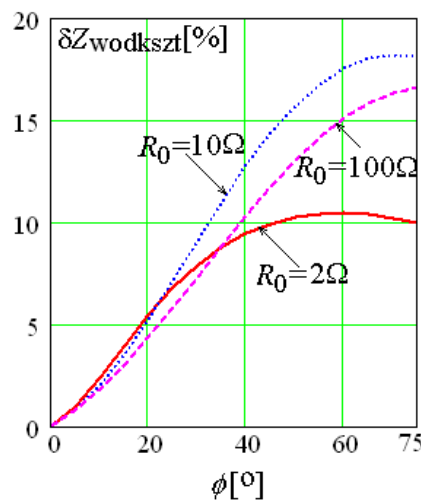
Należy pamiętać, że błędy ujemne są szczególnie niebezpieczne ze względu na fakt, że możliwe jest dopuszczenie do eksploatacji urządzenia o nieskutecznej ochronie przeciwporażeniowej.

Najmniejsze wartości błęd δZ_{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: $Z=1\Omega, E_z=230V, R_0=1, 10, 100\Omega, a_3=0,03, a_5=0,02, a_7=0,01, a_9=0,0025, a_{11}=0,0075, a_{13}=0,01, \alpha_3=0^\circ, \alpha_5=180^\circ, \alpha_7=0^\circ, \alpha_9=\alpha_{11}=\alpha_{13}=0^\circ$

Wówczas błąd δZ_{wodksz} nie przekracza 10% i w całym zakresie kąta ϕ jest dodatni. W całym zakresie kąta ϕ błąd δZ_{wodksz} jest również dodatni, gdy mierzone napięcie ma kształt siodłowy (rys. 4.31).



Rys. 4.31. Błąd $\delta Z_{\text{wodksz}}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega, E_z=230V, R_0=1, 10, 100\Omega,$

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

Jednakże w przypadku krzywej siodłowej błąd δZ_{wodksz} przyjmuje największe wartości przekraczające 18%, gdy rezystancja obciążenia pomiarowego R_0 jest równa 10Ω .

Zmniejszenie błędu δZ_{wodksz} tą metodą jest możliwe poprzez wyznaczenie impedancji Z_w jako wartości średniej impedancji Z_{ws} obliczonych za okres napięcia, zgodnie z zależnością:

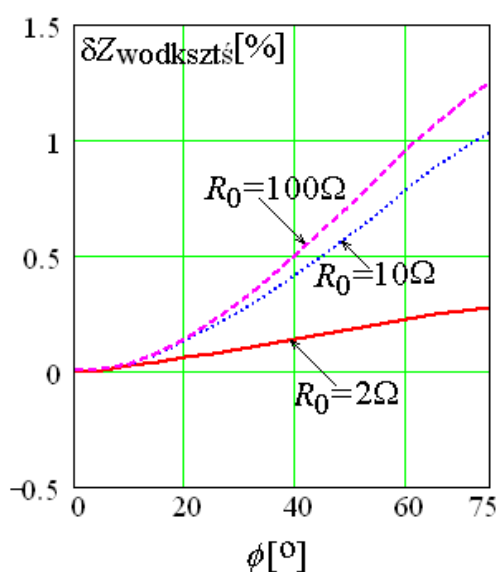
$$Z_{\text{ws}} = \frac{\sum_{i=0}^{N_T} \left[R_0 \sqrt{\frac{\left(E_c \left(t_{1i} + \frac{T}{4} \right) - U_c \left(t_{1i} + \frac{T}{4} + kT \right) \right)^2 + \left(E_b(t_{1i}) - U_b(t_{1i} + kT) \right)^2}{U_c^2 \left(t_{1i} + \frac{T}{4} + kT \right) + U_b^2(t_{1i} + kT)}} \right]}{N_T} \quad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

gdzie: N_T – oznacza liczbę próbek przypadającą na 1 okres napięcia mierzonego.

Wówczas błąd pomiaru impedancji δZ_{wodksz} jest wówczas wyznaczany z następującego wzoru:

$$\delta Z_{\text{wodksz}} = \frac{Z_{\text{ws}} - Z}{Z} \cdot 100\% \quad (4.60)$$

Postępując w ten sposób, dla krzywej wyostrzonej udało się zmniejszyć błąd δZ_{wodksz} 10-krotnie do wartości 1,5% (rys. 4.32).

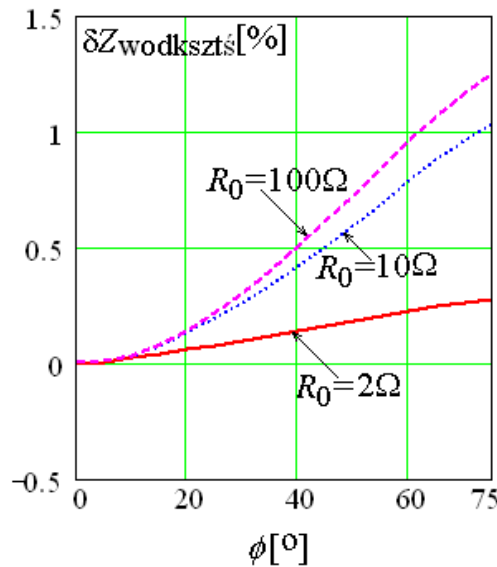


Rys. 4.32. Błąd $\delta Z_{\text{wodksz}}=f(\phi)$ dla danych: $Z=1\Omega, E_z=230V, R_0=1, 10, 100\Omega,$

$$a_3=0,03, a_5=0,02, a_7=0,01, a_9=0,0025, a_{11}=0,0075, a_{13}=0,01,$$

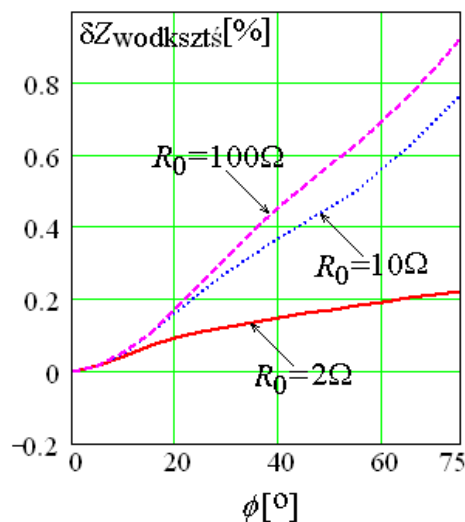
$$\alpha_3=180^\circ, \alpha_5=0^\circ, \alpha_7=180^\circ, \alpha_9=\alpha_{11}=\alpha_{13}=0^\circ$$

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



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

Błąd $\delta Z_{\text{wodkszs}}$ 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 $\delta Z_{\text{wodks}}z$ jak i $\delta Z_{\text{wodks}}s$ 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 jest większa dokładność pomiarów, odwrotnie niż w sytuacji, gdy impedancja pętli mierzona jest przez przyrząd działający w oparciu o metodę z przesunięciem ψ .

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).

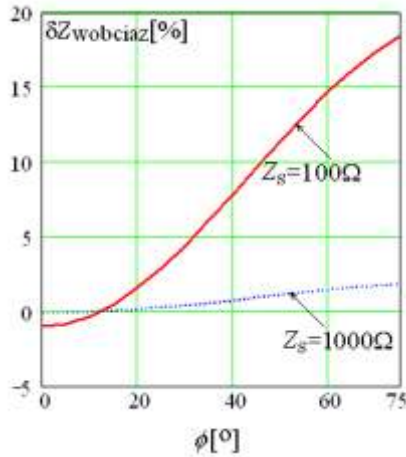
W obwodzie tym impedancja pętli $Z_{\text{wobci}}z$ wyznaczana jest analogicznie jak ze wzoru (4.18):

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

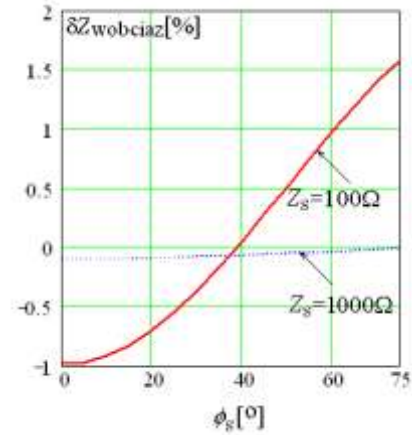
gdzie chwilowe wartości napięć odpowiednio opisują zależności:

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

Rozważając sytuację, w której obciążenie robocze Z_S ma charakter czysto rezystancyjny, czyli $\phi_S=0^\circ$, błąd $\delta Z_{\text{wobci}}z$ może osiągnąć nawet 19% przy stosunku $R_0/Z_S = 0,1$ (rys. 4.35), a dla $R_0/Z_S = 0,01$ nie przekracza 2% (rys. 4.36).



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



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

Błąd $\delta Z_{wobcziaz}$ 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 ψ (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 δZ_{WB} wynikający z budowy miernika i metody pomiarowej (rys. 4.5), zakładając brak korelacji pomiędzy źródłami błędów pomiaru od B1 do B3 i B6, określa zależność:

$$\delta Z_{WB} = |\delta Z_{w\phi}| + |\delta Z_{maxw}| \quad (4.63)$$

gdzie $\delta Z_{w\phi}$ jest błędem fazowym wynikającym z niedopasowania argumentów pętli zwarcia ϕ i obciążenia pomiarowego ϕ_0 , wyznaczanym z następującej zależności:

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

Natomiast błąd δZ_{maxw} 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, 69] bezwzględny błąd pomiaru ΔZ_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:

- ΔR_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 ψ . 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 ψ) wartość rezystora obciążenia pomiarowego R_0 równą 10Ω przy klasach dokładności 0,01, 0,05, 0,1%.

Podobnie jak w przypadku miernika działającego zgodnie z metodą z przesunięciem ψ , 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% błąd 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 ΔE_w . Na błąd ΔE_w składają się następujące czynniki:

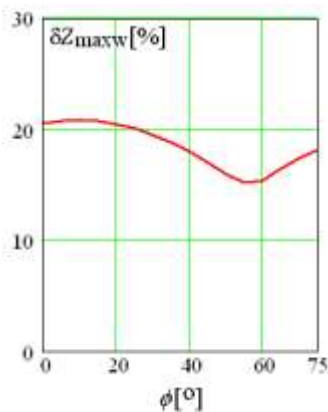
- dokładność przetwarzania napięcia przez przetwornik ΔE_{przetw} ,
- błąd konwersji a/c sygnału pomiarowego ΔE_{DAQ} .

Szczegółowa charakterystyka tych błędów została przedstawiona w rozdziale 4.3.2.3.

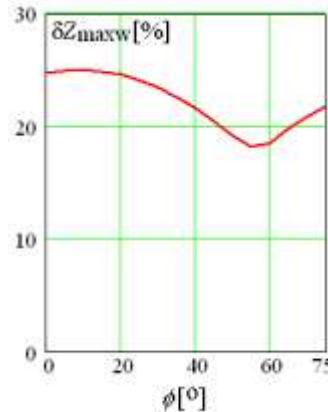
Całkowity graniczny błąd pomiaru napięcia, przeliczony do wejścia układu, dla każdej z czterech próbek napięcia $\Delta E_b=\Delta E_c=\Delta U_b=\Delta U_c=\Delta E_w$, można wyznaczyć poprzez analogię do zależności (4.42), czyli:

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

Wstępnie do analizy przyjęto dane tych samych przetworników napięcia co w rozdziale 4.3.2.3 (tablica 4.3) wraz z kartą pomiarową 6024E. Okazało się, że błąd pomiaru napięcia ΔE_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 rys.4.38).

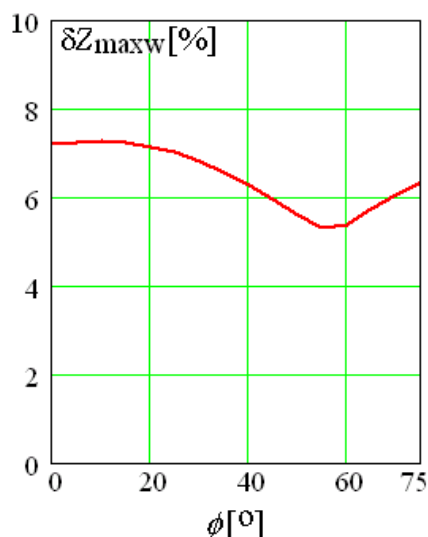


Rys. 4.37. Błąd $\delta Z_{\text{maxw}}=f(\phi)$, $Z/R_0=0,1$ gdy w układzie miernika występuje przetwornik LEM



Rys. 4.38. Błąd $\delta Z_{\text{maxw}}=f(\phi)$, $Z/R_0=0,1$ gdy w układzie miernika występuje przetwornik

Dlatego też poddano analizie przetwornik LEM CV-500, którego błąd pomiaru napięcia ΔE_w wraz z kartą pomiarową 6024E nie przekroczył 0,8V (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: $Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$,
 $\Delta E_b = \Delta E_c = \Delta U_b = \Delta U_c = 0,8V$

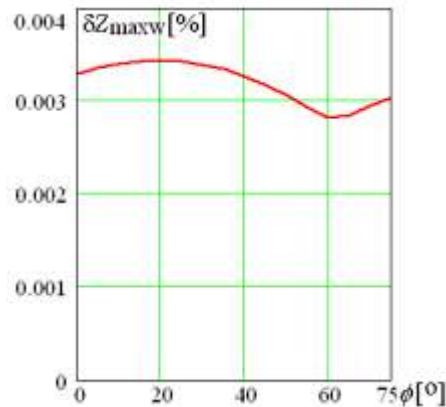
4.4.2.4 Dokładność wyznaczenia momentów czasowych

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

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

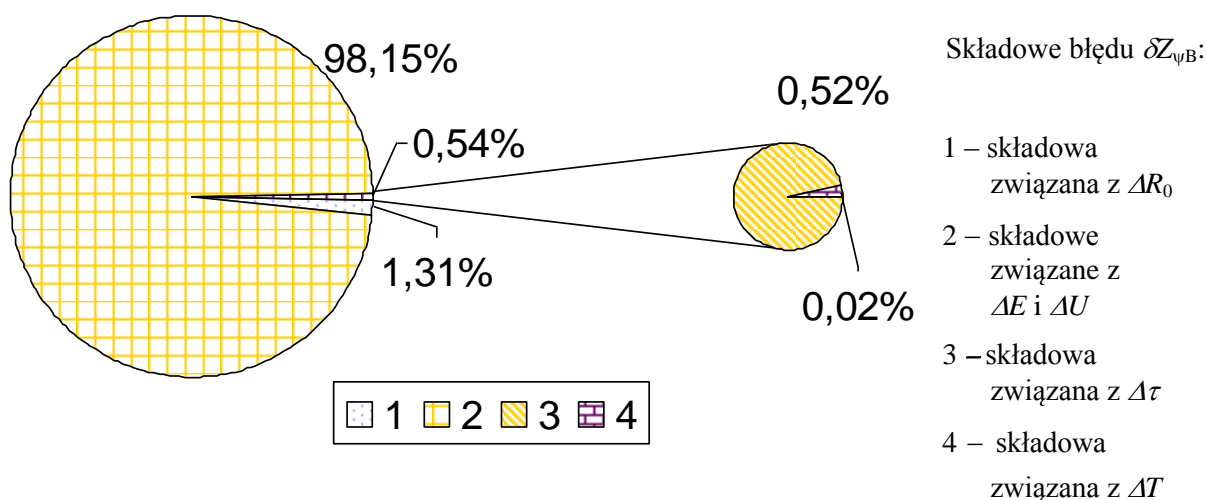


Rys. 4.40. Błąd $\delta Z_{\max w} = f(\phi)$ dla danych $Z=1\Omega$, $R_0=10\Omega$,
 $\Delta t_1=5 \cdot 10^{-5}\text{s}$, $\Delta t_2=5 \cdot 10^{-5}\text{s}$, $\Delta t_3=5,002 \cdot 10^{-5}\text{s}$, $\Delta t_4=5,002 \cdot 10^{-5}\text{s}$

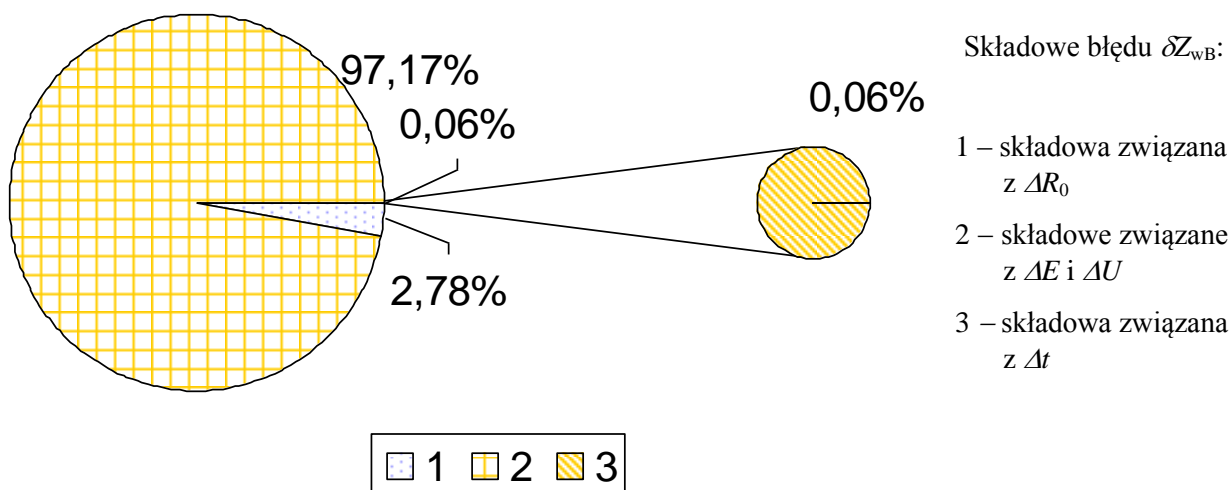
4.5. Podsumowanie przeprowadzonych analiz metrologicznych

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

1. W obu metodach nie występuje błąd fazowy – co jest ich niewątpliwą zaletą,
2. Wrażliwość obu metod na występujące obciążenia robocze sieci jest podobna.
3. Na odkształcenia krzywej napięcia bardziej wrażliwa jest metoda wektorowa. Błąd pomiaru impedancji δZ_{odksz} , gdy odkształcenie napięcia jest na poziomie dopuszczalnym przez normy (THD=8%), nie przekracza 0,1% dla metody z przesunięciem ψ , natomiast dla metody wektorowej może znacznie przekraczać dopuszczalne 30%. Konieczne jest zatem wyznaczenie 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 δZ_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 rysunku 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 1,7%,
 - dla metody wektorowej δZ_{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 rys. 4.42).



Rys. 4.41. Szacunek udziałów poszczególnych składowych błędu pomiaru impedancji pętli zwarciowej $\delta Z_{\psi B}$, realizowanego zgodnie z metodą z przesunięciem ψ , dla przyjętych parametrów: $E_z=230V$, $Z=1\Omega$, $R_0=4\Omega$, $\Delta R_0=4m\Omega$, $\Delta E_{\psi}=\Delta U_{\psi}=1,54V$, $\Delta \tau=\Delta T=0,3\mu s$

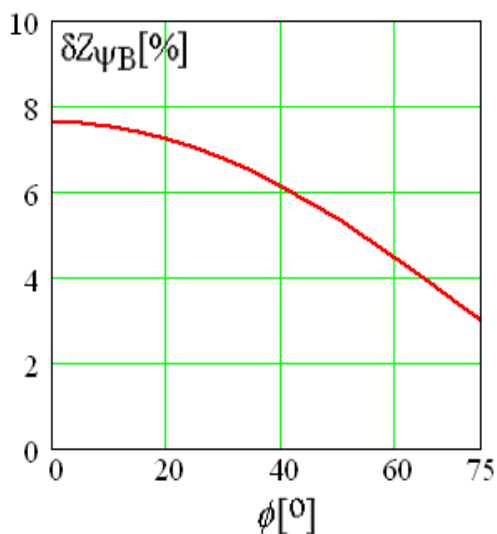


Rys. 4.42 Szacunek udziałów poszczególnych składowych błędu pomiaru impedancji pętli zwarciowej δZ_{wB} , realizowanego zgodnie z metodą wektorową dla przyjętych parametrów: $E_z=230V$, $Z=1\Omega$, $R_0=4\Omega$, $\Delta R_0=4m\Omega$, $\Delta E_w=\Delta U_w=0,8V$, $\Delta t=0,5\mu s$

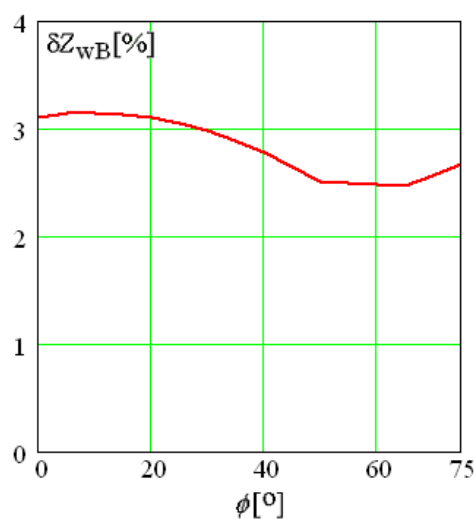
Rezystor obciążenia pomiarowego powinien być wykonany z tolerancją maksymalnie $\pm 0,1\%$.

W mierniku działającym zgodnie z metodą z przesunięciem ψ istotny jest również dokładny pomiar przesunięcia τ między napięciami.

7. Błąd pomiaru impedancji pętli δZ_B wynikający z parametrów miernika (dla danych przyjętych w rozdziale 4) w przypadku metody z przesunięciem ψ nie przekracza 7,6%, a dla metody wektorowej δZ_{wB} i 3,2% (rys. 4.43).

Metoda z przesunięciem ψ 

Metoda wektorowa



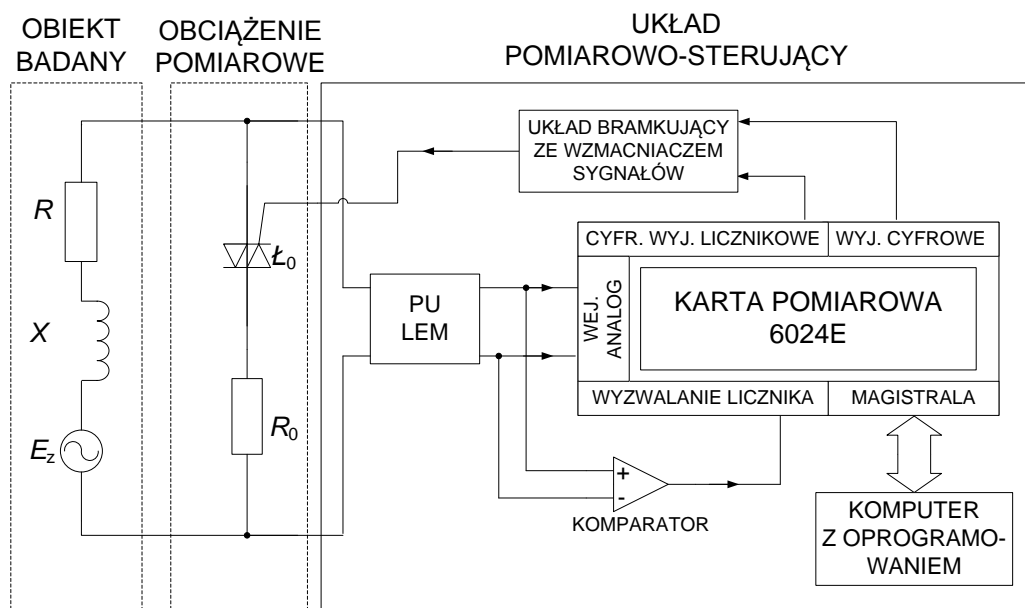
Rys. 4.43. Błąd $\delta Z_B = f(\phi)$ dla danych: $E_z = 230\text{V}$, $Z = 1\Omega$, $R_0 = 4\Omega$, $\Delta E_\psi = \Delta U_\psi = 1,54\text{V}$, $\Delta E_w = 0,8\text{V}$, $\Delta R_0 = 4\text{m}\Omega$, $\Delta \tau = 0,3\mu\text{s}$, $\Delta T = 0,3\mu\text{s}$, $\Delta t = 0,5\mu\text{s}$

8. Całkowity błąd pomiaru impedancji pętli zwarciowej δZ_C wyznaczony na podstawie błędów cząstkowych δZ_A i δZ_B oszacowanych w punkcie 4 i 7 wynosi: dla miernika działającego zgodnie z metodą z przesunięciem $\delta Z_{\psi C}$ 9,3%, natomiast dla miernika działającego w oparciu o metodę wektorową – $\delta Z_{wC} = 6,3\%$.
9. Na podstawie przeprowadzonych analiz właściwości metrologicznych metody z przesunięciem ψ 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 ψ . Metodę wektorową powinno się stosować w miejscu, gdzie krzywa napięcia jest bliska sinusoidzie. Jeśli natomiast krzywa napięcia w miejscu pomiaru jest silnie odkształcona wówczas pomiar będzie dokładniejszy, gdy zostanie wykonany odmianą metody wektorowej opracowaną przez R. Roskosza [55]. Na obciążenia robocze obie metody reagują podobnie.

5. Fizyczny model miernika impedancji pętli

5.1. Struktura modelu miernika i obiektu badanego

W ramach niniejszej pracy, przez autorkę rozprawy, został zbudowany i przebadany model miernika realizujący pomiar impedancji zwarciowej pętli zarówno metodą z przesunięciem ψ jak i metodą wektorową. Jego schemat blokowy został przedstawiony na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Schemat blokowy układu miernika impedancji pętli realizującego metodę z przesunięciem ψ 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 .

Rolę źródła napięcia w układzie pełni generator napięcia firmy Agilent typu 6813B o amplitudzie $E_z=230V$ i częstotliwości $f=50Hz$. Natomiast badaną impedancję 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 $I=4A$.

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. Przy pomocy oprogramowania ustawiane są parametry konfiguracyjne karty pomiarowej, wyznaczone 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.

Szczegółowy schemat zbudowanego miernika impedancji pętli działającego zgodnie z metodą z przesunięciem ψ i metodą wektorową został przedstawiony w załączniku 1.

Na podstawie wyników analizy przeprowadzonej w rozdziale 4, zdecydowano, że rolę przetwornika napięciowego PU w tym układzie pełni LEM typu CV-500. Parametry katalogowe tego przetwornika zostały zestawione w tabelicy 5.1 .

Tablica 5.1. Dane katalogowe przetwornika LEM CV-500 [76]

Zakres pomiarów [V]	Napięcie pierwotne trwałe [V]	Analogowe napięcie wyjściowe	Rezystancja obciążenia [Ω]	Pasma przenoszenia [-1dB]	Dokładność dla 25°C [%]	Napięcie Zasilania [V]
0±500	350	10V/500V	1000	0-300kHz	0,2	±15

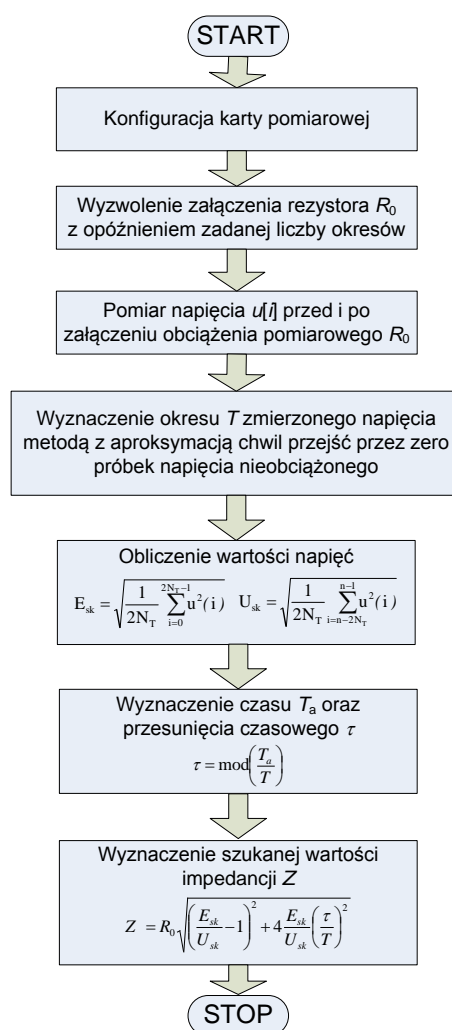
W modelu miernika zastosowano kartę pomiarową firmy National Instruments typu 6024E charakteryzującą się następującymi parametrami [77]:

- rozdzielczość 12-bitów,
- częstotliwość próbkowania do 200kHz,
- 16 wejść i 2 wyjścia analogowe,
- 8 wyjść cyfrowych,
- 2 liczniki 20MHz,
- 2 cyfrowe układy wyzwalania,
- zakres wejściowy i wyjściowy napięcia $\pm 10V$.

Dokładność pomiaru napięcia tą kartą pomiarową przy napięciu wejściowym $\pm 5V$ i wynosi $\Delta E_{DAQ}=7mV$ (tablica 4.3).

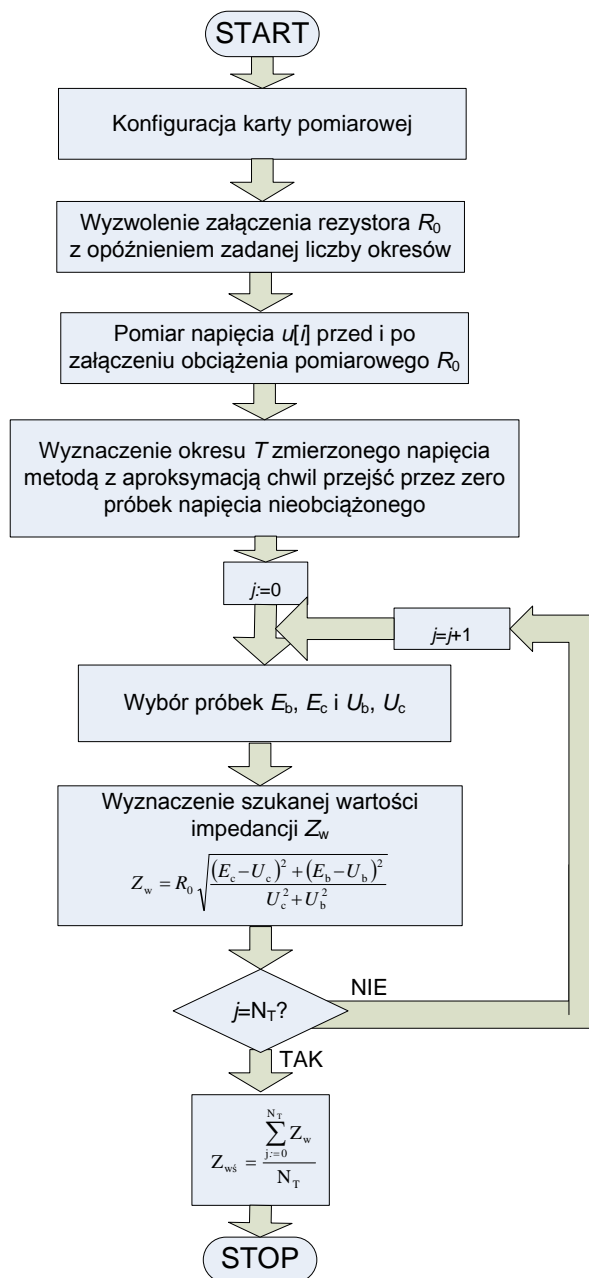
Oprogramowanie miernika impedancji pętli zwarciowej zostało zaprojektowane i wykonane środowisku firmy National Instruments – LabVIEW wersja 7.0.

Algorytm działania programu w przypadku pomiaru impedancji pętli metodą z przesunięciem ψ przedstawia rysunek 5.2 [12].



Rys. 5.2. Algorytm programu do pomiaru impedancji pętli zgodnie z metodą z przesunięciem ψ

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



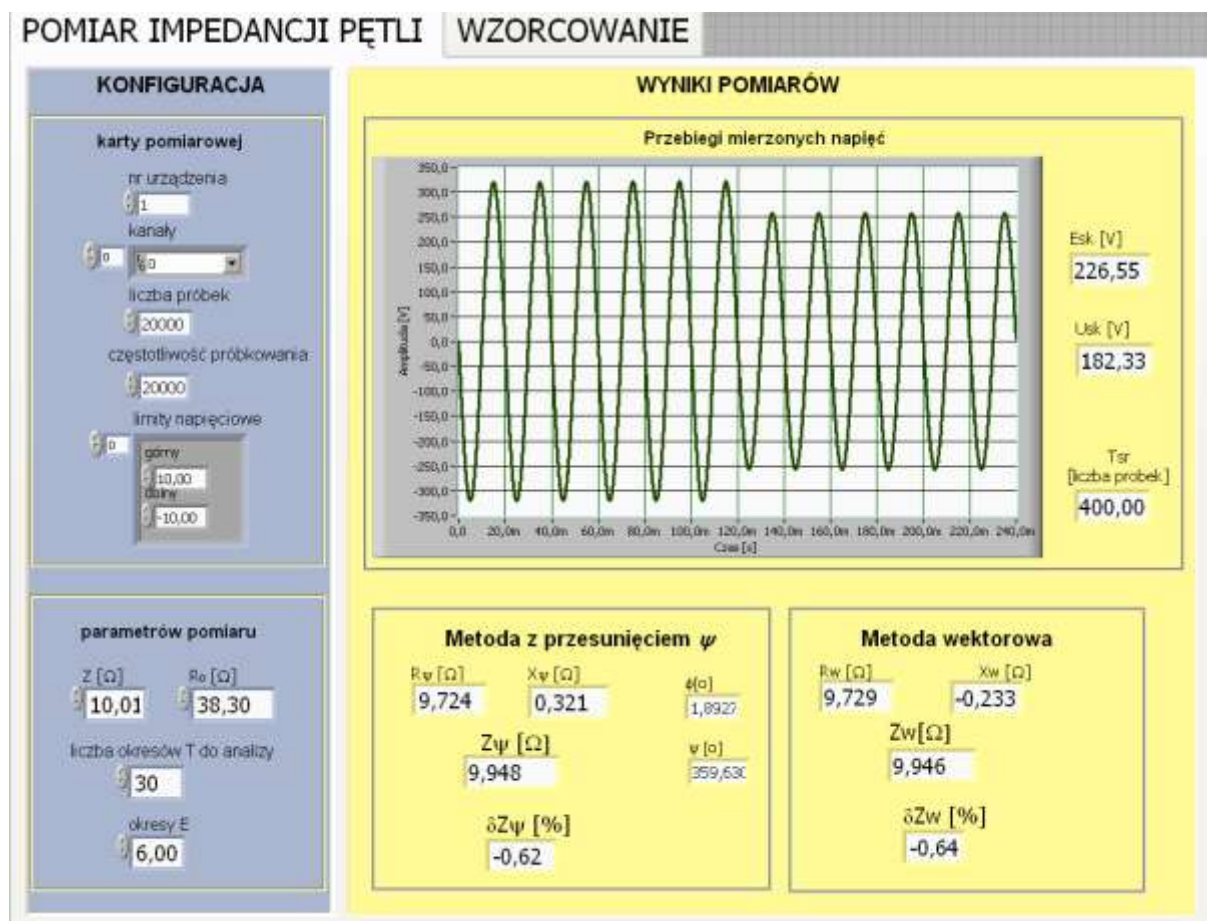
Rys. 5.3 Algorytm programu do pomiaru impedancji miernikiem działającym w oparciu o metodę wektorową

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_{ws} .

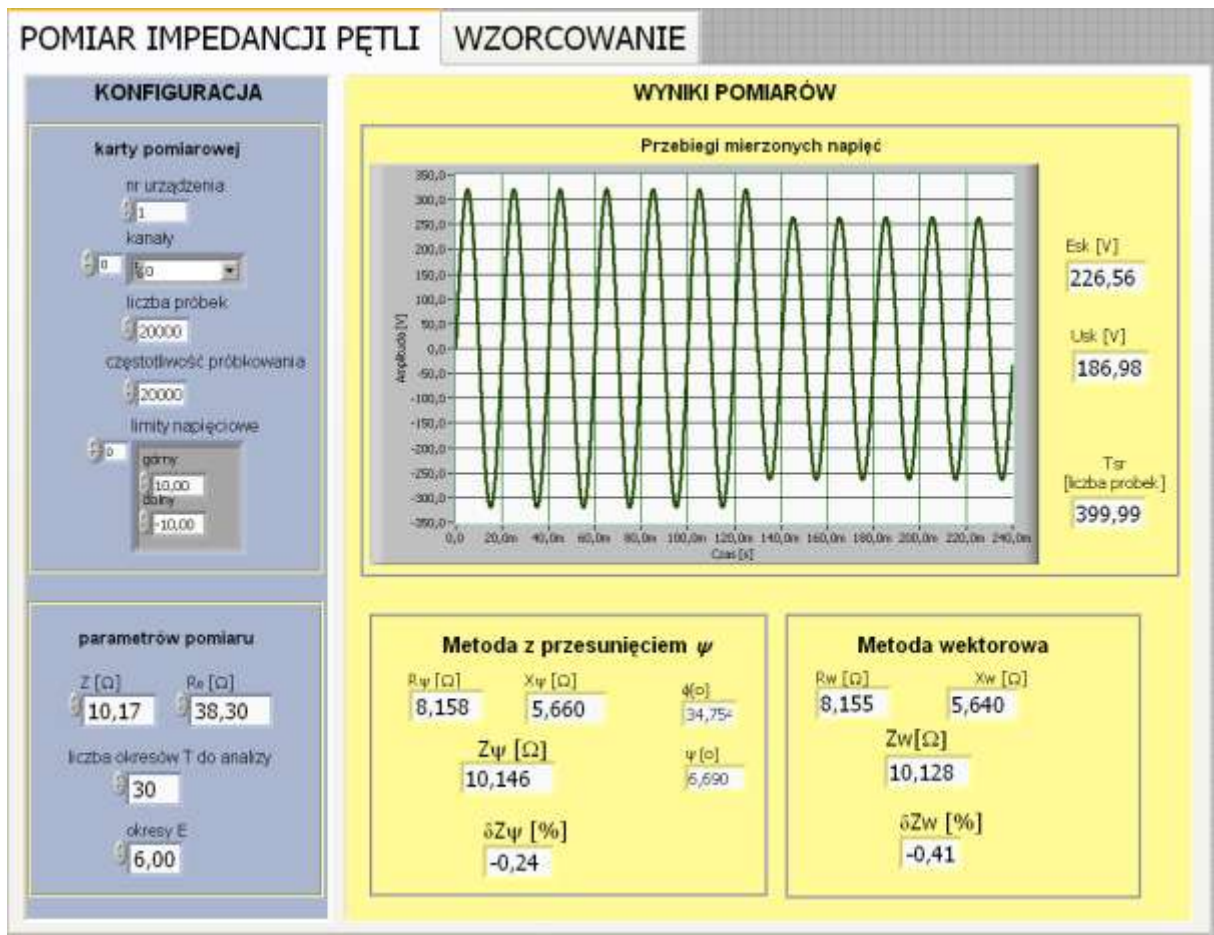
W celu zwiększenia dokładności pomiaru impedancji pętli przewidziano możliwość programowego odfiltrowania wyników pomiarów wykonanych na przykład w czasie zapadu napięcia.

Przed obliczeniem wartości średniej z impedancji Z_{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.

Panel zaprojektowanego programu przedstawiono na rysunku 5.4 i 5.5. 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 (fragmenty diagramów programu zostały przedstawione w załączniku 2).



Rys. 5.4. Panel programu do pomiaru impedancji pętli. Wyniki dla sinusoidalnej krzywej napięcia i danych $E_z=230V$, $Z=10,0134\Omega$, $R_0=38,3\Omega$, $\phi=0^\circ$



Rys. 5.5. Panel programu do pomiaru impedancji pętli. Wyniki dla sinusoidalnej krzywej napięcia i danych $E_z=230V$, $Z=10,17\Omega$, $R_0=38,3\Omega$, $\phi=35^\circ$

Wyniki pomiarów impedancji pętli obiema metodami przedstawione są na jednym panelu, tak, aby łatwiej można było porównać wyniki. Oczywiście istnieje możliwość zaprojektowania osobnego panelu dla każdej z metod pomiaru impedancji pętli.

5.2. Badania eksperymentalne modelu miernika impedancji pętli

W celu sprawdzenia właściwości metrologicznych fizycznego modelu miernika impedancji pętli zwarciowej przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych. Część z tych badań 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 rysunku 3.1 oraz że w badanym obwodzie nie występują odchylenia i wahania napięcia oraz brakuje obciążeń roboczych,
- rolę źródła napięcia pełni generator (sinusoidy lub napięcia zniekształconego) firmy Agilent typu 6813B o amplitudzie $E_z=230V$ i częstotliwości $f=50Hz$,
- badaną impedancję stanowi impedor o module $Z=10,17\Omega$ i argumentcie ϕ nastawianym w następującym zakresie 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75°,
- obciążenie robocze stanowi liniowy rezystor,
- 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 miernika. Zasilono obwód z generatora napięciem sinusoidalnym o amplitudzie 230V i częstotliwości $f=50Hz$. Kalibrację przeprowadzono włączając jako impedancję źródła kolejno rezystancję (trzy rezystory normalne, każdy o rezystancji $R_N=10,0134\Omega$, połączone w różnych konfiguracjach) równą $5,0067\Omega$, $10,0134\Omega$, $20,0268\Omega$ i $30,0406\Omega$ (wyniki pomiarów w załączniku 3). Obciążenie robocze stanowił rezystor $R_0=38,3\Omega$, o dopuszczalnym prądzie $I=4A$ i błędzie 0,1%.

Pomiary te wykazały fakt, występowania w samych układzie błędu multiplikatywnego i addytywnego. Błędy te odpowiednio wynoszą: dla metody z przesunięciem ψ 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 ψ czy też wektorowa) nie przekracza 0,1%.

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

Przy pomocy generatora Agilent typu 6813B nastawiono odkształcenie krzywej napięcia o współczynniku $THD=8\%$ (zgodnie z przepisami [42]), uzyskując amplitudy poszczególnych harmonicznym zestawione w tabelicy 5.2.

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

Tablica 5.2. Wartość amplitud poszczególnych nieparzystych harmonicznym od 3 do 13 dla napięcia 230V o $THD=8\%$ wygenerowanych przez przyrząd Agilent typu 6813B

Numer harmonicznym	Wartość napięcia [V]	a_n
3	16,41	0,07
5	7,81	0,03
7	0,95	0,0004
9	1,86	0,008
11	1,31	0,006
13	0,19	0,0008

Na podstawie pomiarów impedancji pętli zwarciowej przeprowadzonych dwiema metodami oszacowano ich błędy jako różnicę pomiędzy wskazaniem przyrządu a znaną wartością badanej impedancji Z , czyli dla metody z przesunięciem ψ :

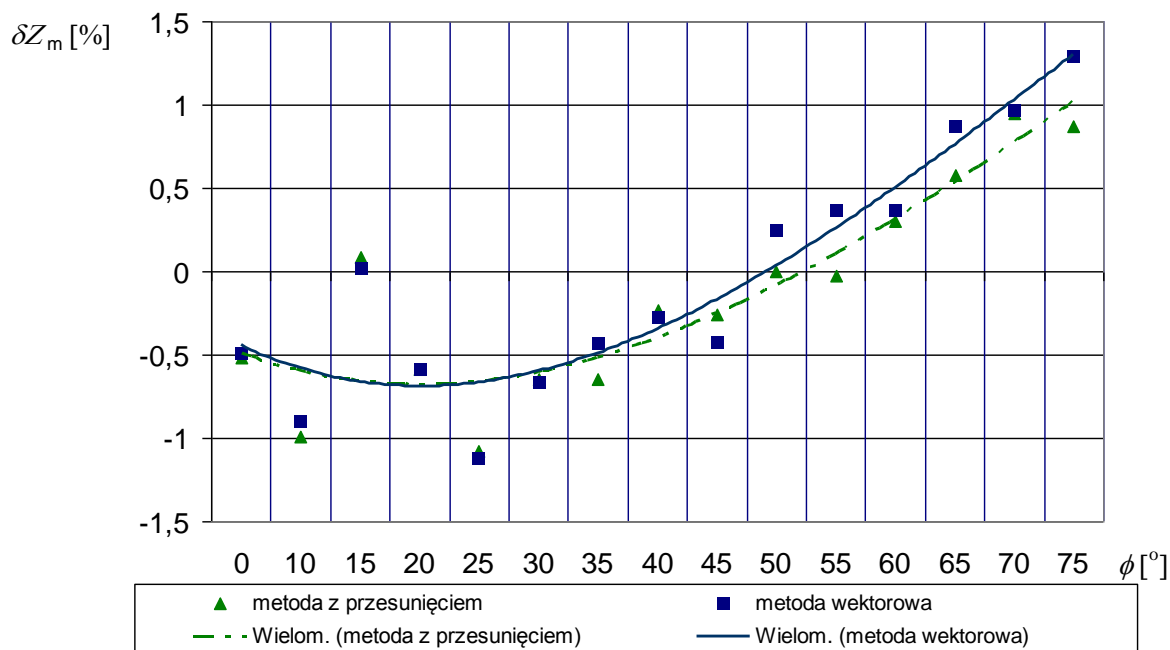
$$\delta Z_{\psi m} = \frac{Z_{\psi m} - Z}{Z} 100\% \quad (5.1)$$

dla metody wektorowej:

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

Przykładowe wyniki pomiarów, w przypadku gdy krzywa napięcia jest sinusoidą, obciążenie pomiarowe R_0 jest równe $38,3\Omega$, a rolę badanej impedancji stanowi impedor o module $Z=10,17\Omega$, zostały zamieszczone w załączniku 3.

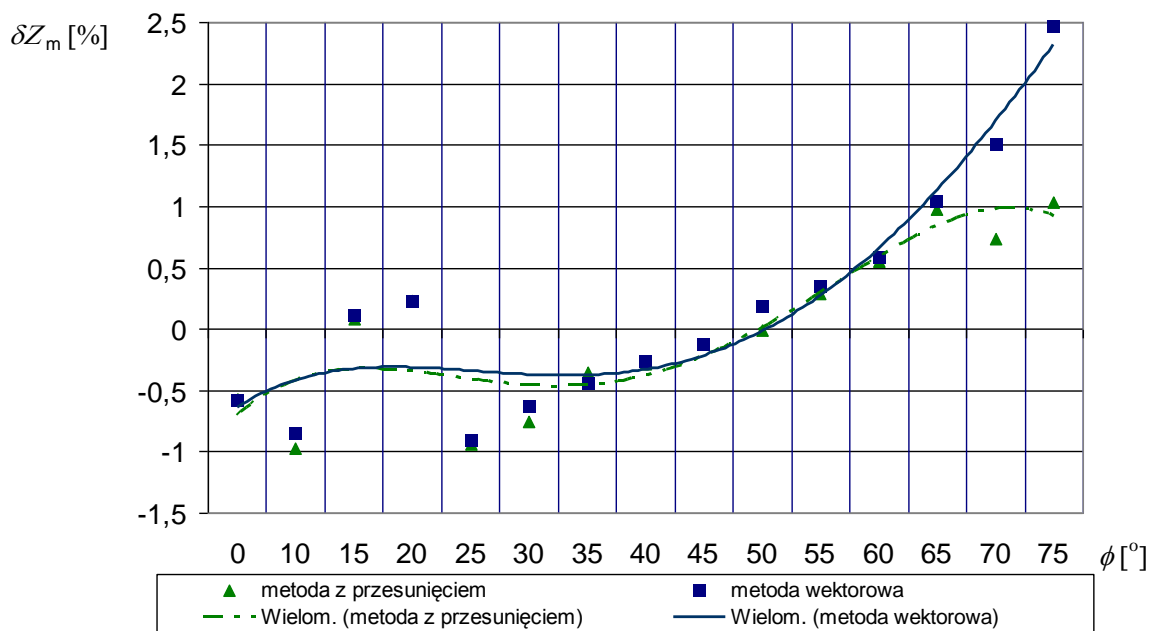
Na rysunku 5.6. przedstawiono błąd pomiaru impedancji pętli zwarciowej (po uwzględnieniu korekcji) δZ_m w funkcji argumentu impedancji ϕ , otrzymany dla miernika działającego zgodnie z metodą z przesunięciem ψ oraz z metodą wektorową.



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

Rozrzut błędu pomiaru impedancji δZ_m dla metody z przesunięciem ψ zawiera się w przedziale od -1,08% do 0,95%, natomiast dla metody wektorowej δZ_{wm} przyjmuje wartości od -1,12% do 1,3%.

W przypadku gdy mierzona krzywa jest odkształcona (THD=8%), błąd pomiaru impedancji pętli δZ_{wm} znacznie dla metody wektorowej od -0,63% do 2,5% (rys.5.7), a dla metody z przesunięciem pozostaje na tym samym poziomie $\delta Z_{\psi m}$ od -0,97% do -1,03%. Wyniki eksperymentalne potwierdzają wyniki symulacji komputerowych przeprowadzone w rozdziale 4, które wykazały, iż bardziej wrażliwa na odkształcenia napięcia jest metoda wektorowa.

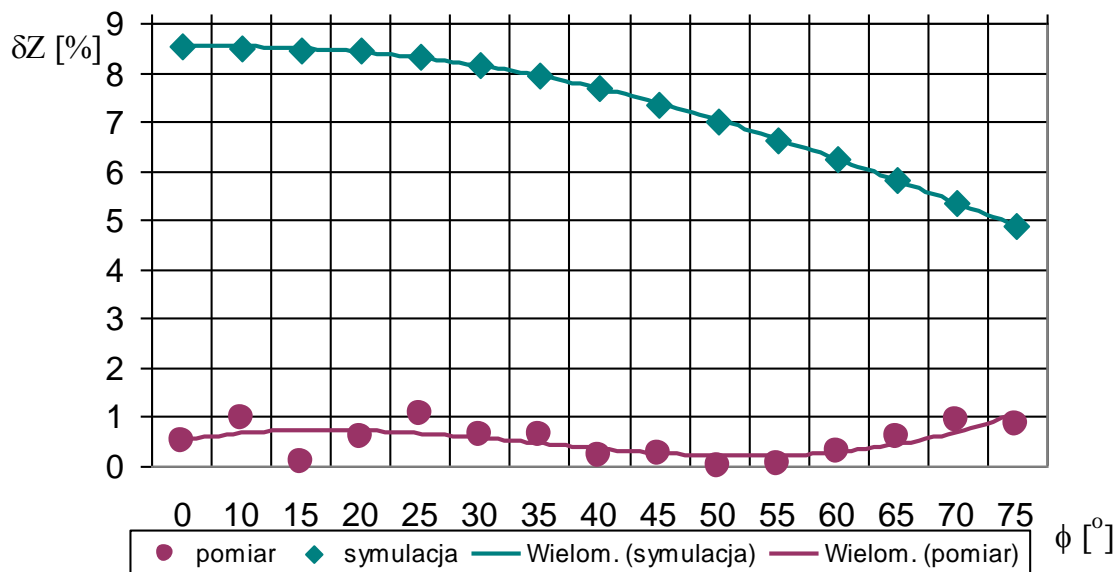


Rys. 5.7. Błąd $\delta Z_m=f(\phi)$ dla odkształconej krzywej napięcia (THD=8%) i danych: $E_z=230V$, $Z=10,17\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

W celu weryfikacji wyników analiz symulacyjnych przeprowadzonych w rozdziale 4 z eksperymentem porównano błąd δZ_B wynikający z parametrów miernika i metody pomiaru z bezwzględną wartością błędu $|\delta Z_m|$.

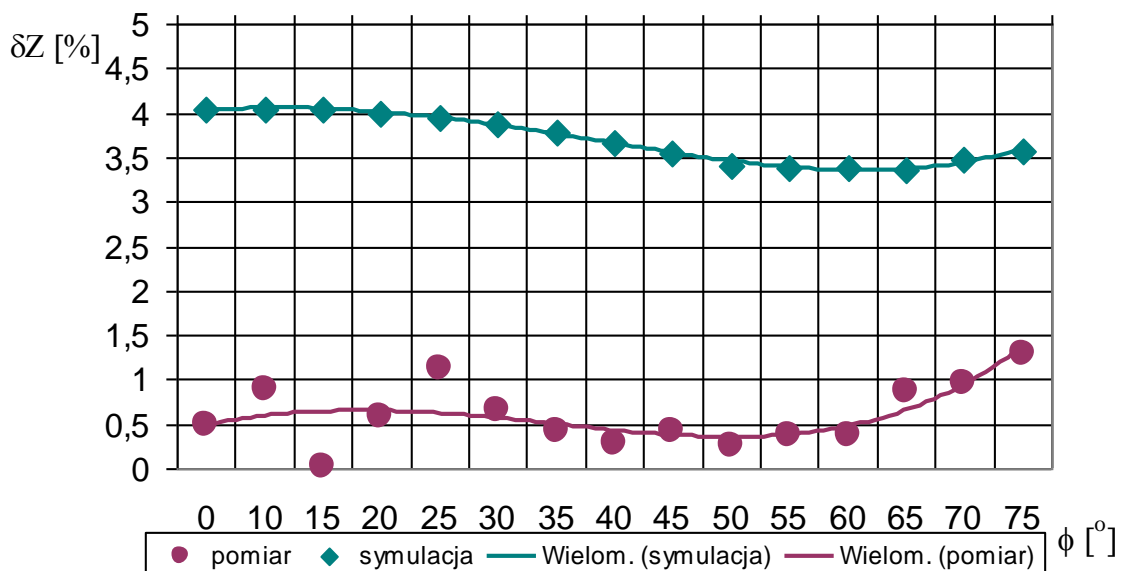
Na rysunku 5.8 przedstawiono wykresy błędów $\delta Z_{\psi B}$ i $|\delta Z_{\psi m}|$ w funkcji argumentu pętli zwarcia, dla przypadku gdy miernik impedancji pętli działa w oparciu o metodę z przesunięciem ψ .

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 ψ .



Rys. 5.8. Błędy $|\delta Z_{\psi m}|$ i $\delta Z_{\psi B}=f(\phi)$ dla sinusoidalnej krzywej napięcia i danych: $E_z=230V$, $Z=10,17\Omega$, $R_0=38,3\Omega$, $\Delta E_{\psi}=\Delta U_{\psi}=1,54V$, $\Delta R_0=0,04\Omega$, $\Delta \tau=0,3\mu s$, $\Delta T=0,3\mu s$

Na rysunku 5.9 zaprezentowano funkcje błędów δZ_{wB} i $|\delta Z_{wm}|$ w funkcji argumentu pętli zwarcia ϕ , dla przypadku gdy miernik impedancji pętli działa zgodnie z metodą wektorową.



Rys. 5.9. Błędy $|\delta Z_{wm}|$ i $\delta Z_{wB}=f(\phi)$ dla sinusoidalnej krzywej napięcia i danych: $E_z=230V$, $Z=10,17\Omega$, $R_0=38,3\Omega$, $\Delta E_w=\Delta U_w=0,8V$, $\Delta R_0=0,04\Omega$, $\Delta t=0,5\mu s$

W tym wypadku również 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 twierdzić, iż uzyskano zbieżność wyników eksperymentalnych z symulacyjnymi dla metody wektorowej.

5.3. Podsumowanie badań doświadczalnych miernika

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

- metoda wektorowa jest bardziej wrażliwa na odkształcenia napięcia niż metoda z przesunięciem ψ . Co prawda wyniki pomiarów eksperymentalnych nie są tak wyraźne, jak wyniki badań symulacyjnych, z tego powodu, iż oprogramowanie miernika impedancji pętli działającego zgodnie z metodą wektorową zostało zaprojektowane tak, że wartość impedancji pętli wyznaczana jest jako średnia za okres impedancji;
- uzyskano zbieżność wyników wpływających z symulacji komputerowych i eksperymentalnych, bowiem zarówno gdy pomiar impedancji pętli dokonywany jest zgodnie z metodą z przesunięciem ψ jak i metodą wektorową funkcja błędu $|\delta Z_m|=f(\phi)$ 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 δZ_m impedancji pętli zbudowanym i zaprezentowanym 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 ψ czy też wektorowa) dla danych: $E_z=230V$, $R=10,0134\Omega$, $R_0=38,3\Omega$, nie przekracza 0,1%. Natomiast, gdy mierzona jest impedancja pętli $Z=10,17\Omega$ wówczas błąd pomiaru δZ_m nie przekracza 3%, gdy napięcie jest napięcie jest odkształcone (dla THD=8%) i nie przekracza 1,5% gdy jest ono sinusoidalnego kształtu.

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.

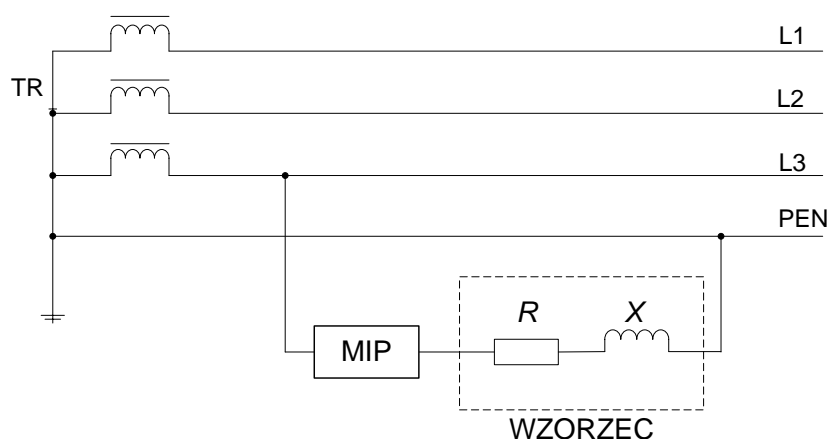
Sposób sprawdzania i kalibracji mierników impedancji pętli zwarciowej opisany w rozdziale 5.4 jest poprawny tylko w warunkach, w których jest możliwe zapewnić zerową impedancję źródła (jak w przypadku zasilania z generatora Agilent typu 6813B). W większości przypadków jednakże impedancja źródła jest niezerowa i niemożliwa do określenia. 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, 10, 11, 40, 46, 58, 62] mierników impedancji pętli. Większość stosowanych metod do wzorcowania MIP nie uwzględnia impedancji źródła zasilania, w związku z czym wzorcowanie obarczone jest dodatkowym błędem.

Autorka rozprawy proponuje, aby mierniki impedancji pętli działające w oparciu o metodę z przesunięciem ψ i metodę wektorową wzorcować w układzie, będącym modyfikacją układu do wzorcowania opracowanym przez J. Sawickiego [58]. Modyfikacja taka nie była do tej pory opisywana w literaturze. 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 sprawdzania mierników impedancji (zalecany przez przepisy [11]) jest układ przedstawiony na rysunku 6.1.



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

Źródłem zasilania w tej metodzie jest transformator o mocy nie mniejszej niż 400kVA, napięciu fazowym $230V \pm 23V$, 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 $0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ”.

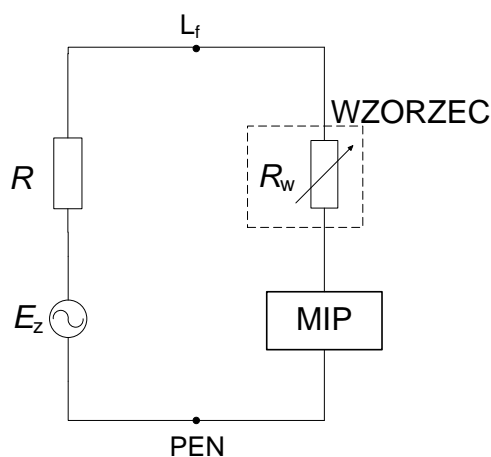
Wzorcowanie miernika impedancji pętli polega na porównaniu wartości zmierzonych z wzorcowymi w ustalonych punktach kontrolnych na wszystkich zakresach pomiarowych i na tej podstawie wyznaczeniu błędu podstawowego. W przypadku gdy maksymalna wartość błędu podstawowego będzie mniejsza od błędu dopuszczalnego,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

Metoda ta nie uwzględnia impedancji transformatora, która może wynosić kilkanaście $m\Omega$ co w przypadku sprawdzania małych zakresów rzędu setek $m\Omega$ może stanowić kilkunastoprocentowy błąd. Tym samym wzorcowanie przyrządu do pomiaru impedancji pętli w tym układzie może być obciążone błędem.

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).

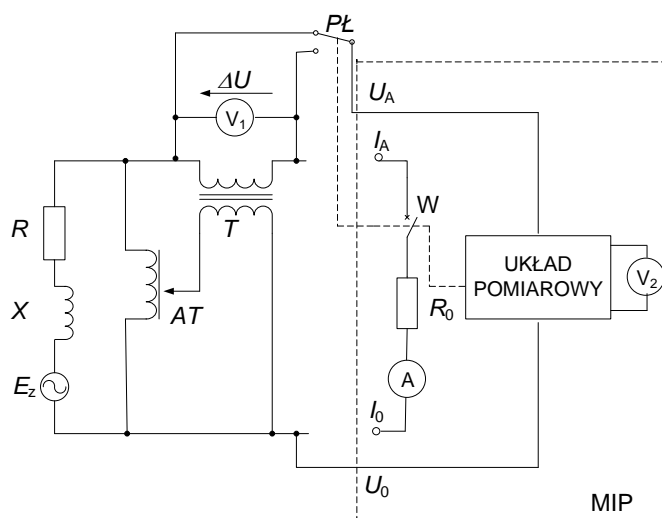


Rys. 6.2. Układ do wzorcowania mierników impedancji pętli metodą klasyczną

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 zgrubnych szacunków.

W literaturze opisuje się układy do wzorcowania impedancji pętli zwarciowej, które zapewniają eliminację wpływu impedancji wewnętrznej zasilania na wynik pomiaru [9, 10, 58, 62]. Układem takim jest układ opracowany przez Dobrzańskiego i Nawrockiego [9, 10], który został przedstawiony na rysunku 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 ΔU , które jest z fazy z napięciem źródłowym E , mierzone jest woltmierzem V_1 .

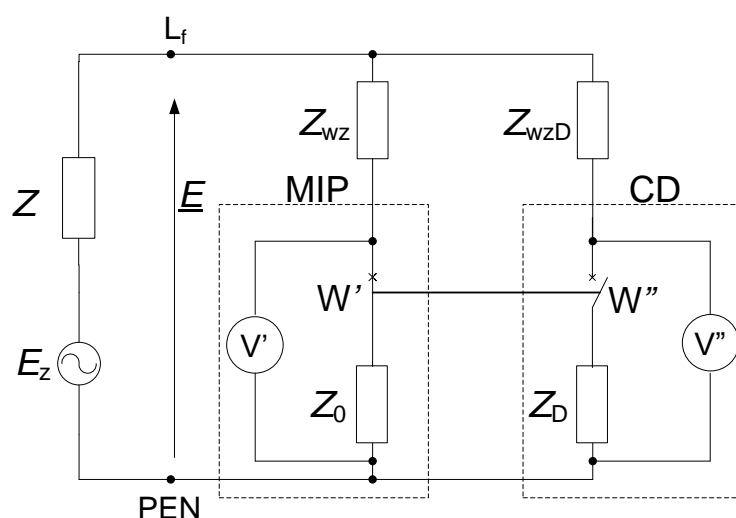
Poprzez przełącznik PŁ na miernik impedancji pętli podawane jest najpierw napięcie źródłowe E a potem napięcie sztucznego zwarcia U . Miernik wyznacza różnicę tych napięć i wskazuje napięcie ΔU_M . Dokładność pomiaru napięcia ΔU_M wynika z klasy woltmierzem V_1 . Wadą tego rozwiązania jest fakt, iż umożliwia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

Na bazie tego rozwiązania został przez Stafiniaka [62] opracowany sposób i urządzenie 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 $E - \Delta U$ i prądu zwarciowego I) z symulowaną wartością impedancji wzorcowej przy pomocy urządzenia do wzorcowania. Badanie tego urządzenia zostały przeprowadzone jedynie dla przypadku rezystancyjnego charakteru źródła (czyli przy założeniu, że $X=0$).

W niniejszej pracy 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] – rysunek 6.4.



Rys. 6.4. Układ do wzorcowania mierników impedancji pętli opracowany przez Sawickiego [58]

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.

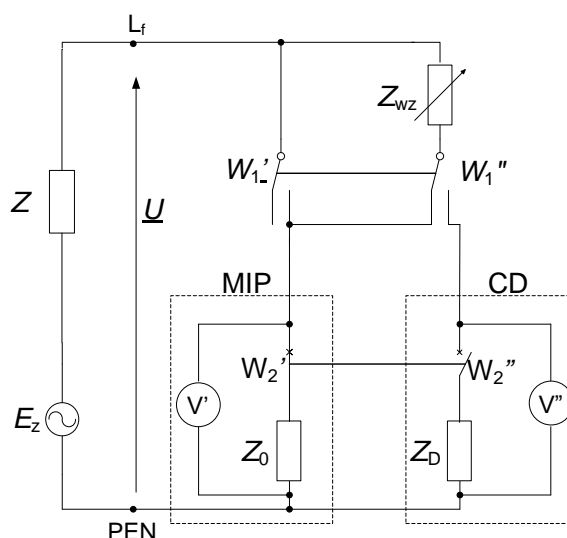
Po włączeniu do sieci prąd pomiarowy miernika przepływa przez impedancję wzorcową Z_{wz} wtedy, gdy przełącznik W znajduje się w położeniu jak na rysunku 6.4. Gdy przełącznik W jest w drugim położeniu – W'' , wówczas prąd miernika nie płynie, natomiast przez wzorcowy impedor Z_{wzD} płynie prąd obciążenia 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 fazory napięć. W przypadku sprawdzania mierników impedancji pętli zwarciowej wzorcowanie nie odbywało się w całym zakresie argumentu ϕ , a jedynie dla kątów na jakie zbudowano impedor Z_0 i dla jakich występowało dopasowanie argumentu ϕ_0 i ϕ_w .

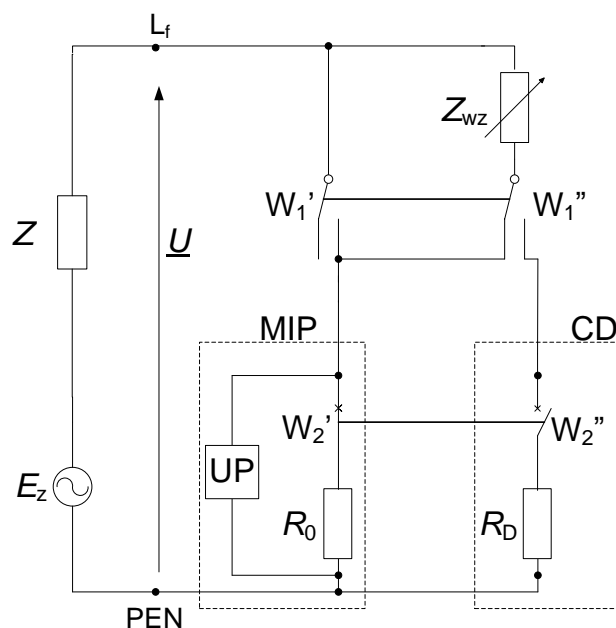
Eliminację pierwszej z wymienionych wad zaproponował P. Prawdzik [46], zastępując dwa impedory wzorcowe jednym Z_{wz} (rys. 6.5), dzięki czemu zmniejszył się koszt urządzenia do wzorcowania, ilość styków oraz, co najważniejsze, zwiększyła się dokładność pomiarów.



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 członu dopełniającego o parametrach identycznych jak wzorcowany przyrząd. Jednakże nadal nie została wyeliminowana druga z wymienionych wad układu J. Sawickiego.

Autorka rozprawy jest współautorką układu do wzorcowania [57] przedstawionego na schemacie (rys. 6.6), umożliwiającego sprawdzanie mierników z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym, w którym jako wzorec zastosowano impedor i mimo tego nie występuje błąd wynikający z niedopasowania 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:

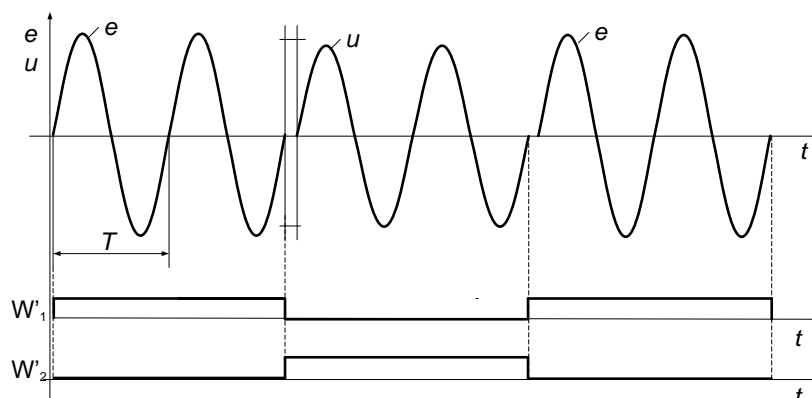
- rolę woltomierza z rysunku 6.4 pełni układ pomiarowy UP składający się z przetwornika napięcia oraz przetwornika a/c i komputera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie,
- rolę przełącznika dwubiegunowego pełni zespół trzech tyrystorów zsynchronizowanych z badanym miernikiem MIP i członem dopełniającym 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 δZ_ϕ).

Układ składa się ze źródła E_z (o sinusoidalnej SEM) 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} ,

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

dzięki której widać, że impedancja wewnętrzna źródła zasilającego Z nie wpływa na wynik pomiaru.

W procesie wzorcowania miernik pracuje w taki sam sposób, jak przy normalnym pomiarze impedancji pętli zwarciowej.

6.2.1. Sprawdzanie miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem ψ

Przedstawiony układ do wzorcowania umożliwia sprawdzanie mierników impedancji pętli z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym, w których pomiar opiera się o wyznaczenie składowych ortogonalnych fazona napięcia. Metodą tego typu jest metoda z przesunięciem fazowym ψ , w której fazorowa różnica napięć jest równa:

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

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:

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

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:

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

gdzie: E_{bw} i E_{cw} są próbkami nieobciążonego napięcia 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 obciążonego napięcia 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 ψ

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

Natomiast kąt fazowy obciążenia i impedancji wzorcowej Z_{wz} oznaczano jako ψ_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 układu do wzorcowania oraz oszacowanie dokładności tego układu, aby wyznaczyć z jakim maksymalnie błędem będzie wzorcowany w przedstawionym układzie (rys. 6.6) miernik, działający zgodnie z metodą z przesunięciem ψ oraz z metodą wektorową.

Natomiast analiza wrażliwości układu powinna dać odpowiedź na pytanie, które z parametrów układu najbardziej, które zaś najmniej wpływają na dokładność pomiaru.

Źródłem E_z w tym układzie jest generator sinusoidalnej SEM, dlatego też 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 τ (dla miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem ψ), dokładności wyznaczenia chwil czasowych $t_1 \div t_4$ (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 $E_z=230V$ i częstotliwości $f=50Hz$,
- impedor wzorcowy o module $Z_{wz}=1\Omega$ o dokładności 0,1%, 0,01%, 0,05% i argumencie 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° ,

- 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 $\delta E_{\text{przetw}}=0,2\%$,
- karta pomiarowa firmy National Instruments typu 6024E mierząca napięcie na poziomie $\pm 5V$ z dokładnością $\Delta E_{\text{DAQ}}=7\text{mV}$ (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 ψ

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 ψ 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 ΔR_0 sprawdzanego przyrządu oraz rezystancji członu dopełniającego ΔR_D ,
- niedokładności wykonania impedancji wzorcowej ΔZ_{wz} oraz wartości argumentu $\Delta \phi_{wz}$,
- niedokładności pomiaru napięć ΔE przed i ΔU po załączeniu obciążenia pomiarowego,
- niedokładności pomiaru przesunięcia $\Delta \tau$ między zmierzonymi napięciami,
- niedokładności wyznaczenia okresu napięcia ΔT .

Zgodnie z ogólną regułą przenoszenia błędów [19, 69] bezwzględny błąd pomiaru $\Delta Z_{\text{max}wz\psi}$ impedancji $Z_{wz\psi}$ jest następujący:

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

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

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

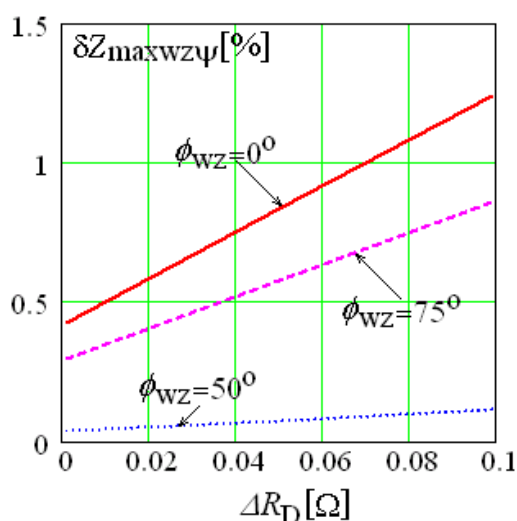
Dla oszacowania $\delta Z_{\max w z \psi}$, określonej zależnością (6.19), wykonano symulacje wpływu poszczególnych parametrów wzoru (6.17) na dokładność pomiaru impedancji pętli.

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

Wpływ tolerancji wykonania rezystancji obciążenia pomiarowego R_0 i R_D będzie miał miejsce zawsze, gdyż rezystory wykonane są z pewną tolerancją określoną przez producenta.

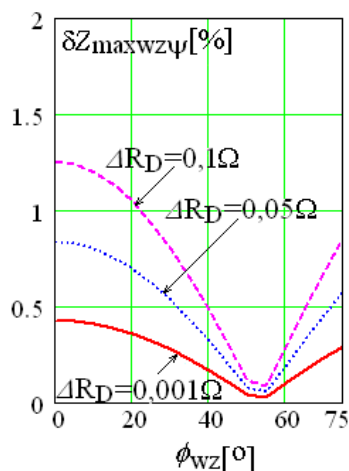
Wrażliwość układu na dokładność wykonania rezystancji członu dopełniającego ΔR_D jest funkcją liniową (rys. 6.8).



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

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

Co więcej wartość współczynnika $\frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial R_D}$ jest funkcją argumentu impedancji wzorcowej ϕ_{wz} (rys. 6.9).



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

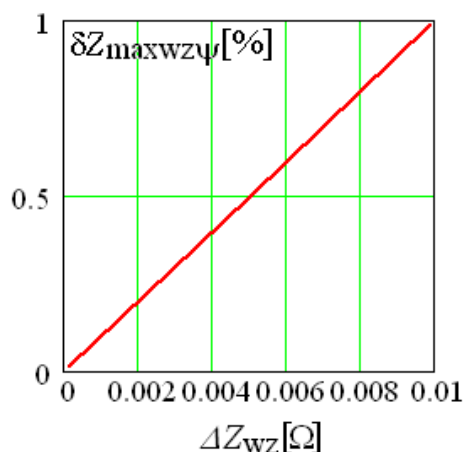
Współczynnik ten maksymalną wartość przyjmuje dla $\phi_{wz} = 0^\circ$ (dla $\Delta R_0 = 0,05\Omega$, $\Delta R_D = 0,1\Omega$ nie przekracza 1,5%), natomiast minimum osiąga dla $\phi_{wz} = 55^\circ$ (dla $\Delta R_0 = 0,05\Omega$, $\Delta R_D = 0,001\Omega$ nie przekracza 0,09%).

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 ΔZ_{wz} i dokładności wykonania argumentu $\Delta \phi_{wz}$. Im większa wartość impedancji wzorca Z_{wz} , tym większa wartość zmierzonej 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 Ω oraz $\Delta \phi_{wz} = 0 \div 5^\circ$. Współczynnik $\frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial Z_{wz}}$ 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%.

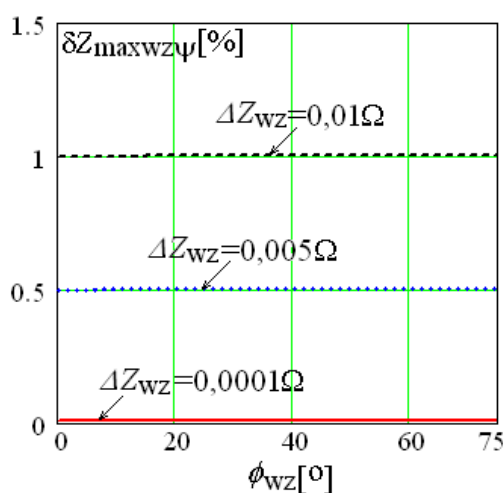


Rys. 6.10. Błąd $\delta Z_{\max w z \psi} = f(\Delta Z_{wz})$ dla danych: $E_z = 230V$, $Z_{wz} = 1\Omega$, $R_D = R_0 = 10\Omega$, $\phi_{wz} = 75^\circ$, $\Delta\phi_{wz} = 5^\circ$

Dokładność wykonania kąta fazowego impedancji wzorcowej ϕ_{wz} w zakresie od 0° do 5° [11] nie wpływa na dokładność procesu wzorcowania miernika.

Współczynnik $\frac{\partial Z_{wz\psi}}{\partial Z_{wz}}$ nie zależy od wartości kąta fazowego impedancji wzorcowej ϕ_{wz}

(rys. 6.11).



Rys. 6.11. Błąd $\delta Z_{\max w z \psi} = f(\phi_{wz})$ dla danych: $E_z = 230V$, $Z_{wz} = 1\Omega$, $R_D = R_0 = 10\Omega$, $\phi_{wz} = 0^\circ$, $\Delta Z_{wz} = 0,0001, 0,005, 0,01\Omega$, $\Delta\phi_{wz} = 5^\circ$

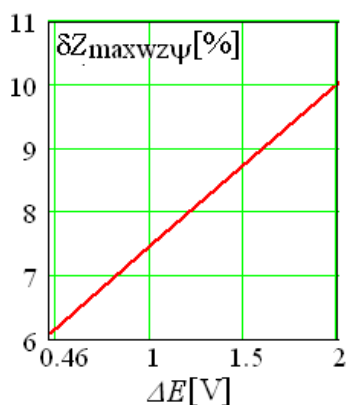
6.3.1.3. Dokładność pomiaru napięcia

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 ΔE_{ψ} zależy od następujących czynników:

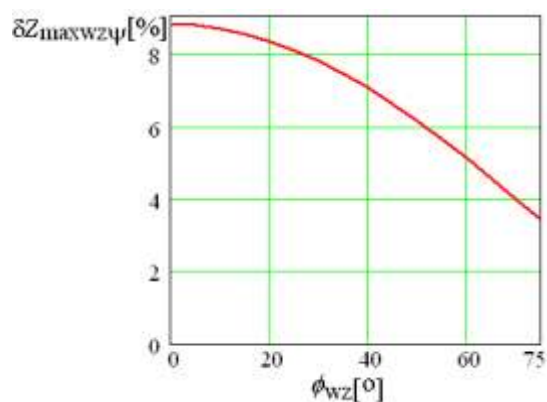
- niedokładności przetwarzania napięcia przez przetwornik ΔE_{przetw} ,
- błędów konwersji a/c sygnału pomiarowego ΔE_{DAQ} ,
- błędów ΔE_{sk} wynikającego z wyznaczenia wartości skutecznej napięcia z niecałkowitej liczby próbkowanych okresów.

Na podstawie rozważań przeprowadzonych w rozdziale 4.3.2.3. i zgodnie z danymi z tabelicy 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 8,8% błędu pomiaru impedancji (rys. 6.12).



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

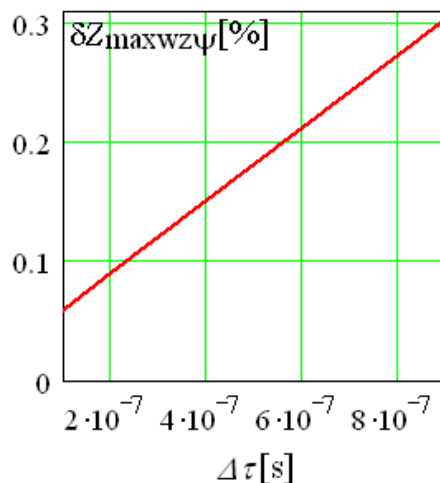
Istotne jest, że wartość tego błędu zmienia się w funkcji argumentu ϕ_{wz} (rys. 6.13), maksymalną wartość przyjmuje dla $\phi_{\text{wz}}=0^\circ$, a minimalną dla $\phi_{\text{wz}}=75^\circ$.



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

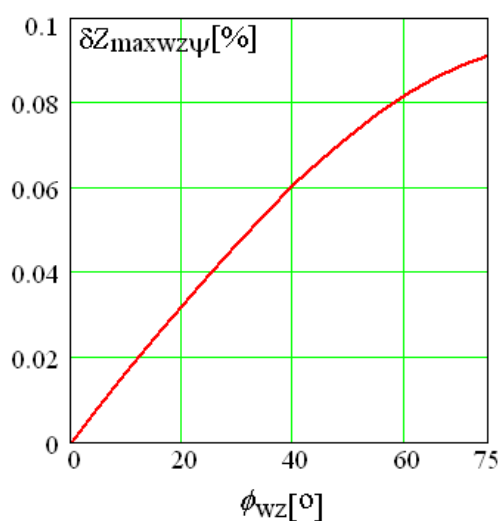
6.3.1.4. Dokładność wyznaczenia przesunięcia τ

Analizując dokładność wzorcowania, należy także uwzględnić błędy wynikające z zasady działania miernika. W przypadku metody z przesunięciem ψ istotną rolę odrywa dokładność pomiaru przesunięcia liniowego τ 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.) będzie rzędu $0,3\mu\text{s}$, co przekłada się na błąd pomiaru impedancji pętli $\delta Z_{\text{maxwz}\psi}$ rzędu $0,12\%$ (rys. 6.14).



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

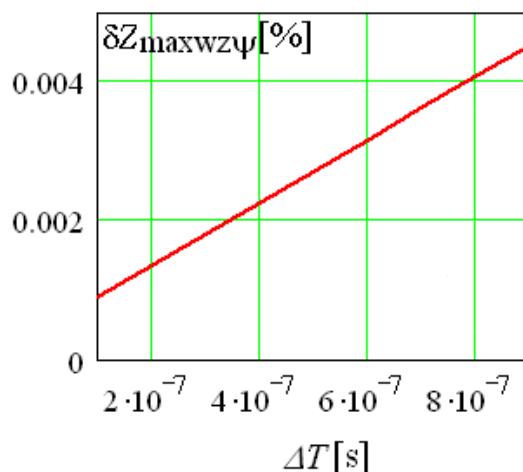
Błąd pomiaru przesunięcia $\Delta\tau$ zależy od wartości argumentu impedancji wzorcowej ϕ_{wz} (rys. 6.15) i wartość maksymalną przyjmuje dla $\phi_{\text{wz}}=75^\circ$.



Rys. 6.15. Błąd $\delta Z_{\text{maxwz}\psi} = f(\phi_{\text{wz}})$ 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 ΔT . Przy założeniu, że $\Delta T = \Delta \tau$ wpływ błędu ΔT na dokładność pomiaru impedancji okazał się o 2 rzędy mniejszy niż błąd wyznaczenia przesunięcia liniowego $\Delta \tau$ (rys. 6.16).



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

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 ΔR_0 sprawdzanego przyrządu oraz rezystancji członu dopełniającego ΔR_D ,
- niedokładności wykonania impedancji wzorcowej ΔZ_{wz} oraz jej argumentu $\Delta \phi_{wz}$,
- niedokładności pomiaru napięć ΔE_b , ΔE_c przed i ΔU_b , ΔU_c po załączeniu obciążenia pomiarowego R_0 ,
- niedokładności wyznaczenia chwil czasowych Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 , Δt_4 .

Błąd pomiaru ΔZ_{wzw} impedancji Z_{wzw} opisuje następująca zależność:

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

Celem dalszej analizy jest znalezienie błędu granicznego δZ_{maxwzw} pomiaru impedancji Z_{wzw} szacowanego według wzoru:

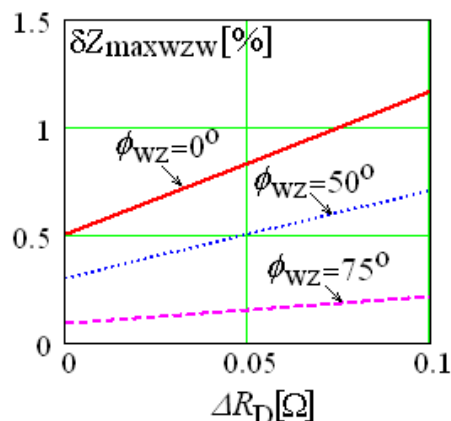
$$\begin{aligned} \delta Z_{\text{maxwzw}} = & \frac{\Delta Z_{\text{maxwzw}}}{Z_{\text{wz}}} = \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial R_0} \cdot \frac{R_0}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta R_0 \right| + \left| \frac{\partial Z_{\text{wzw}}}{\partial R_D} \cdot \frac{R_D}{Z_{\text{wz}}} \cdot \delta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

Dla oszacowania błędu δZ_{maxwzw} , 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

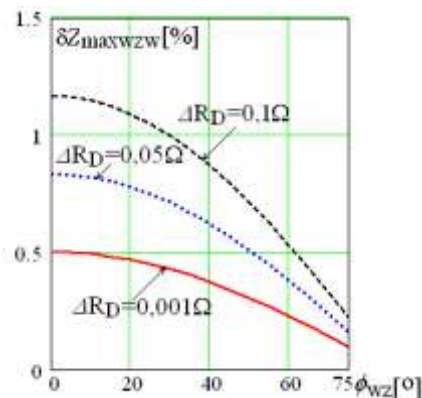
Wzrost niedokładności wykonania rezystancji członu dopełniającego ΔR_D i obciążenia pomiarowego ΔR_0 ma taki sam wpływ jak w przypadku wzorcowania miernika działającego w oparciu o metodę z przesunięciem ψ (rys. 6.7), a mianowicie powoduje liniowy wzrost błędu pomiaru impedancji (rys. 6.17).



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

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

Zależność współczynnika $\frac{\partial Z_{wzw}}{\partial R_D}$ od argumentu impedancji wzorcowej ϕ_{wz} przedstawia rysunek 6.18.



Rys. 6.18. Błąd $\delta Z_{\max wzw} = f(\phi_{wz})$ dla danych: $E_z = 230V$, $Z_{wz} = 1\Omega$, $R_D = R_0 = 10\Omega$, $\Delta R_0 = 0,05\Omega$, $\Delta R_D = 0,001, 0,05, 0,1\Omega$

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 ψ (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 ψ .

Współczynnik $\frac{\partial Z_{wzw}}{\partial Z_{wz}}$ jest liniowy, wraz ze wzrostem niedokładności wykonania modułu

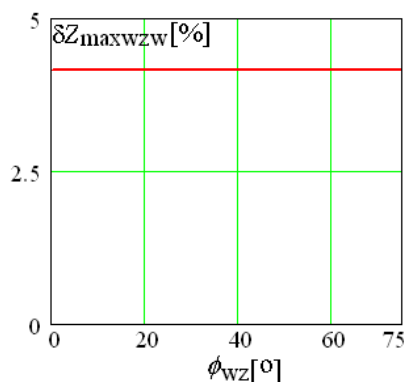
wzorca liniowo rośnie niedokładność wzorcowania w prezentowanym układzie i wartości błędu pokrywają się z wynikami uzyskanymi dla metody z przesunięciem ψ (rys. 6.10).

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

6.3.2.3. Dokładność pomiaru napięcia

Kolejnym źródłem błędu 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 ΔE_w zależy od dokładności przetwarzania napięcia przez przetwornik ΔE_{przetw} oraz błędu konwersji a/c sygnału pomiarowego ΔE_{DAQ} (błędy te zostały wyznaczone w rozdziale 4, a ich wartości zestawiono w tabelicy 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 ΔE_w wynosi 0,8V. W tym przypadku błąd pomiaru impedancji nie powinien przekroczyć 4,2% (rys. 6.19).



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

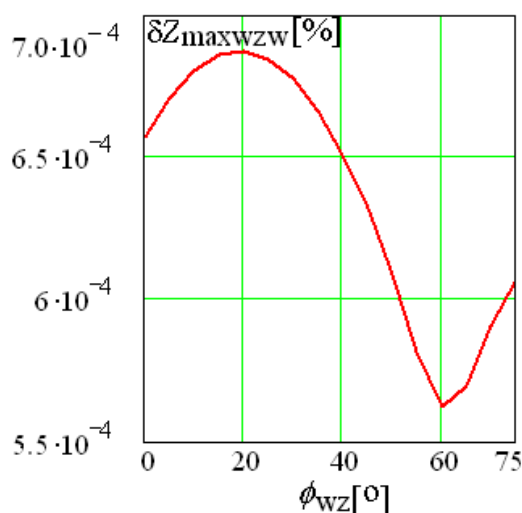
Błąd ΔE nie zależy od wartości argumentu ϕ_{wz} (rys. 6.19).

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 ΔT , czasu próbkowania T_p oraz położenia danej próbki.

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.

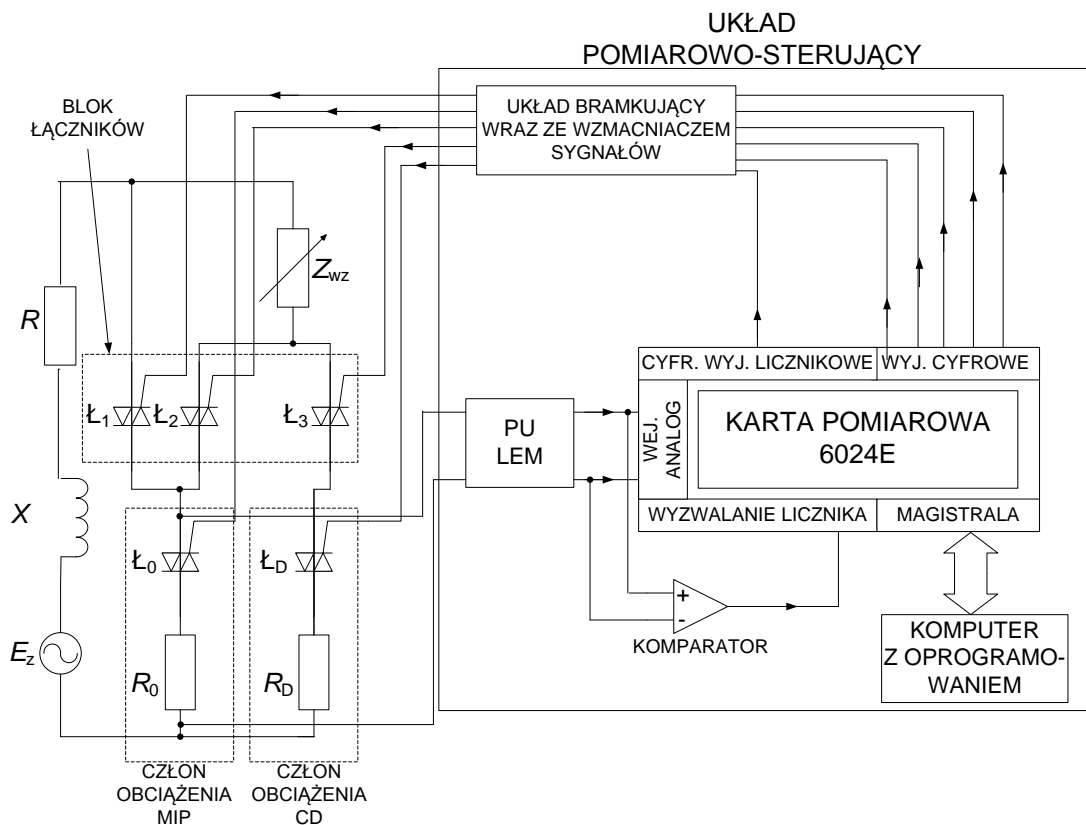


Rys. 6.20. Błąd $\delta Z_{\max wzw} = f(\phi_{wz})$ dla danych: $E_z=230V, Z_{wz}=1\Omega, R_D=R_0=10\Omega,$
 $\Delta t_1=\Delta t_2=\Delta t_3=\Delta t_4=0,5\mu s$

Błąd według rysunku 6.20 stanowi odpowiedni składnik we wzorze (6.22), jego wartość jest rzędu $10^{-4}\%$.

6.4. Realizacja fizycznego układu do wzorcowania miernika impedancji pętli zwarciowej

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



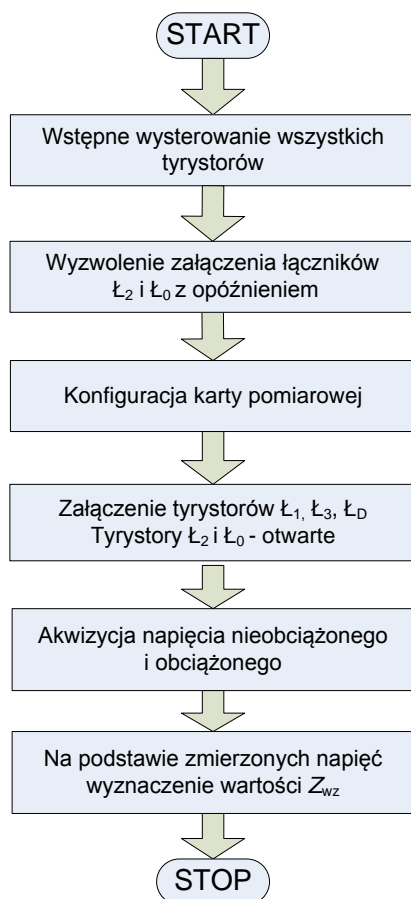
Rys. 6.21. Struktura miernika badanego wraz z układem do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej

Układ składa się ze:

- źródła napięcia o sinusoidalnej SEM E_z o 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 L_0 ,
- członu dopełniającego – o parametrach identycznych jak wzorcowany przyrząd, 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 rysunku 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 L_1 , L_2 i L_3 załączających naprzemian wzorcowany przyrząd lub człon obciążenia dopełniającego.

Integralną częścią układu jest zaprojektowane w środowisku LabVIEW oprogramowanie, 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 rysunku 6.22.

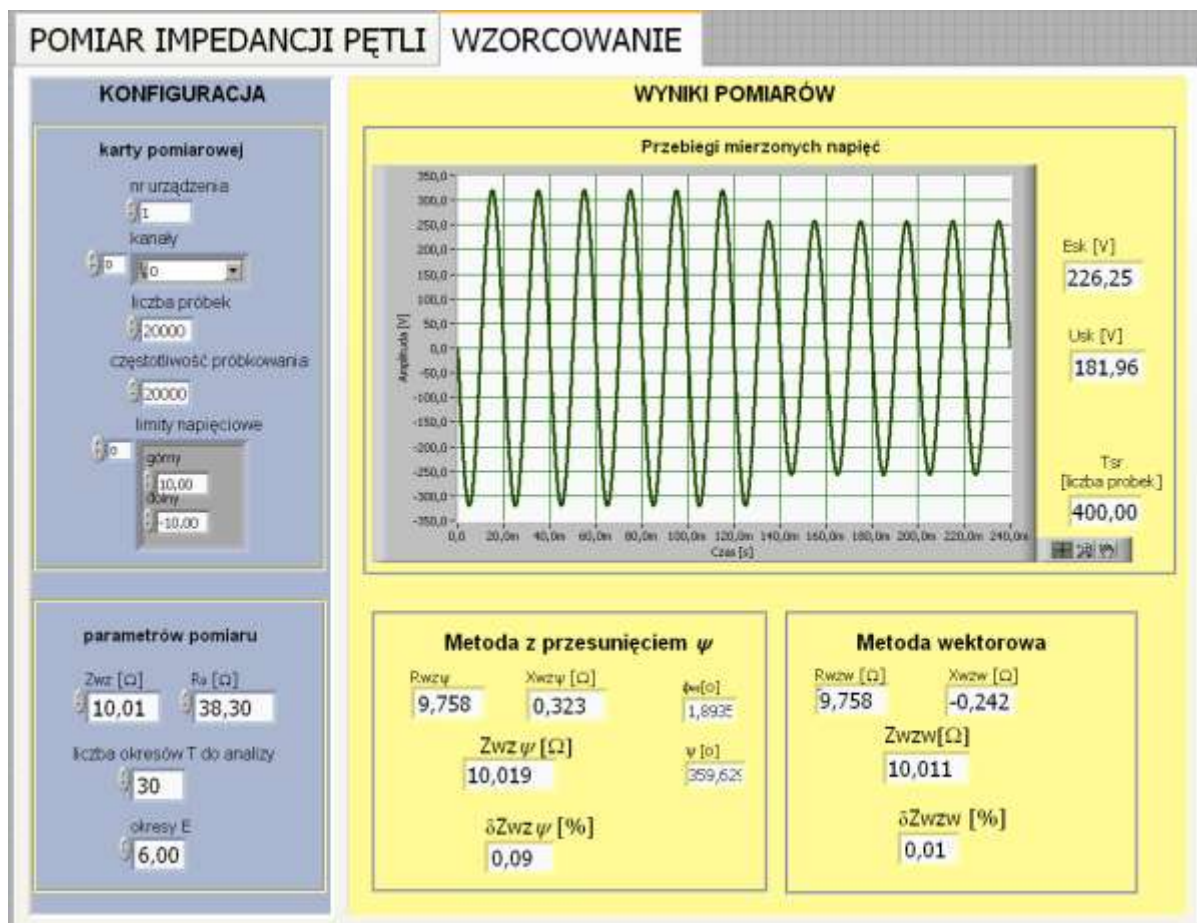


Rys. 6.22. Algorytm programu umożliwiającego wzorcowanie MIP

Zgodnie z tym algorytmem pierwszym krokiem jest wstępne wysterowanie wszystkich tyrystorów w układzie pomiarowym. Następnie ustawione jest wyzwolenie załączenia tyrystorów L_2 i L_0 z zadaniem opóźnieniem. Dalej dokonywana jest konfiguracja karty

pomiarowej. Kolejny etap to załączenie tyrystorów 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 nieobciążonego napięcia. Następnie załączane są tyrystory 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 ψ oraz obliczenie impedancji Z_{wz} i wyświetlenie wyniku na panelu.

Panel układu do wzorcowania, zaprojektowany i wykonany przez autorkę rozprawy, został przedstawiony na rysunku 6.23.



Rys. 6.23. Panel urządzenia do wzorcowania mierników impedancji pętli, przeprowadzony dla danych $E_z=230V$, $Z_{wz}=10,0134\Omega$, $R_0=38,5\Omega$

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.



Rys. 6.24. Wygląd stanowiska laboratoryjnego z fizycznym modelem miernika i układu do wzorcowania

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

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

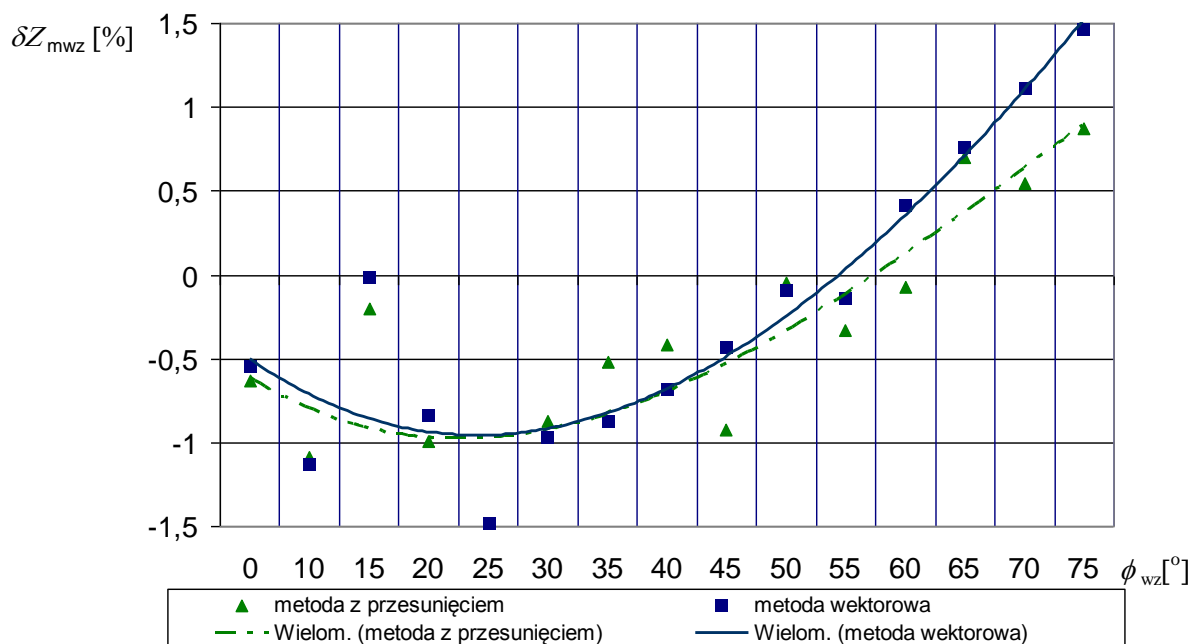
W zrealizowanym układzie do wzorcowania MIP zastosowano cztery łączniki zamiast pięciu (bez łącznika L_D z rys. 6.21), co jest w pełni słuszne dla łączników o idealnych charakterystykach. Zastosowanie łączników półprzewodnikowych może powodować błąd pomiaru w układzie, który jest możliwy do skompensowania w procesie kalibracji układu wzorcującego.

Proces kalibracji przeprowadzono przy sinusoidalnym kształcie napięcia o amplitudzie 230V i częstotliwości 50Hz, bez dołączania impedancji wewnętrznej źródła. Jako impedancję wzorcującą włączano w układ rezystancję (trzy rezystory normalne, każdy o rezystancji $R_N=10,0134\Omega$, połączone w różnych konfiguracjach) równą $5,0067\Omega$, $10,0134\Omega$, $20,0268\Omega$ i $30,0406\Omega$ (wyniki pomiarów w załączniku 3). Natomiast rolę obciążenia roboczego pełnił rezystor $R_0=38,3\Omega$, o dopuszczalnym prądzie $I=4A$ i błędzie 0,1%.

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

Dokonano sprawdzenia dokładności procesu wzorcowania po uwzględnieniu korekcji włączając w obwód jako impedancję wzorcową Z_{wz} jeden z rezystorów normalnych $R_N=10,1324\Omega$. Błąd wzorcowania w tym wypadku, niezależnie od metody działania miernika (czy jest to metoda z przesunięciem ψ czy też wektorowa) nie przekracza 0,2%.

Sprawdzono, jaki będzie błąd wzorcowania przy włączeniu jako wzorca impedora $Z_{wz}=10,17\Omega$. Gdy wzorcowany jest miernik działający zgodnie z metodą z przesunięciem ψ uzyskano wartość błędu zawartą w przedziale -1% do 1%, natomiast gdy jest to metoda wektorowa błąd δZ_{wz} należy do przedziału od -1,5% do 1,5% (rys. 6.25).



Rys. 6.25. Błąd $\delta Z_{mw}=f(\phi_{wz})$ dla danych: $E_z=230V$, $Z_{wz}=10,17\Omega$, $R_0=R_D=38,3\Omega$

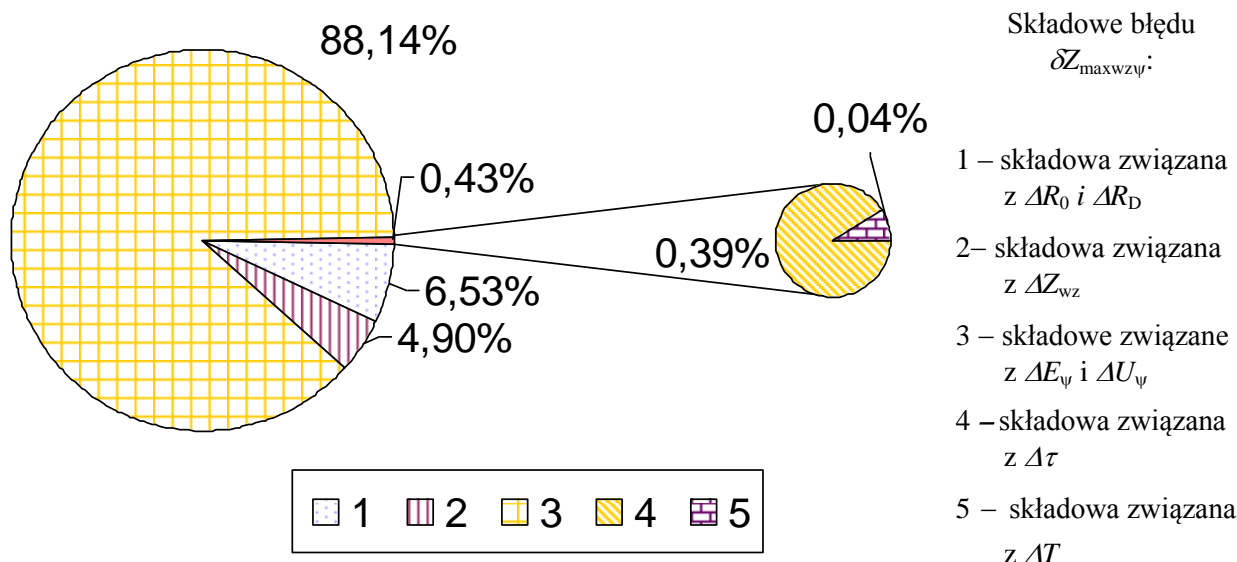
Powodem wzrostu błędu procesu wzorcowania (w porównaniu z wykami uzyskanymi, gdy rolę impedancji wzorcowej pełni rezystor normalny) jest dokładność wykonania impedora wzorcowego.

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

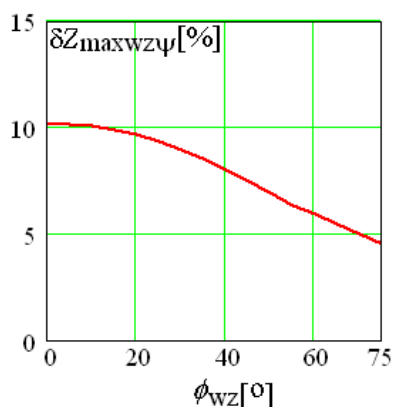
Na podstawie przeprowadzonej analizy wrażliwości układu do wzorcowania okazało się, że w przypadku gdy sprawdzany jest miernik działający w oparciu o wyznaczenie przesunięcia między napięciami ψ , największy wpływ na dokładność wzorcowania ma (w kolejności malejącej) – rys. 6.26: błąd pomiaru napięcia ΔE_ψ i ΔU_ψ , tolerancja wykonania rezystorów obciążenia pomiarowego sprawdzanego przyrządu R_0 i członu dopełniającego R_D , tolerancja wykonania impedancji wzorcowej Z_{wz} i argumentu ϕ_{wz} oraz dokładność wyznaczenia przesunięcia czasowego $\Delta\tau$ między napięciami.



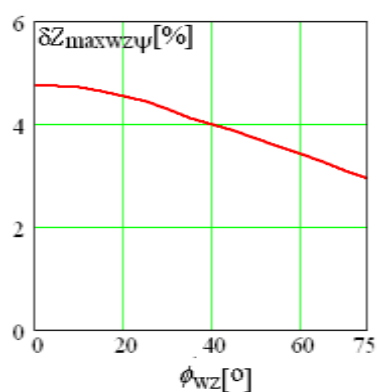
Rys. 6.26 Szacunek udziałów poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji pętli zwarciowej $\delta Z_{\max w \psi}$, w układzie do wzorcowania mierników działających zgodnie z metodą z przesunięciem ψ dla przyjętych parametrów: $E_z=230V$, $Z_{wz}=1\Omega$, $R_0=4\Omega$, $\Delta R_0=\Delta R_D=0,02\Omega$, $\Delta E_\psi=\Delta U_\psi=1,54V$, $\Delta\tau=\Delta T=0,3\mu s$, $\Delta Z_{wz}=0,005\Omega$

Całkowity błąd wzorcowania $\delta Z_{\max w \psi}=f(\phi_{wz})$, dla danych: $\Delta E_\psi=\Delta U_\psi=1,54V$, $\Delta R_D=\Delta R_0=0,02\Omega$, $\Delta Z_{wz}=0,005\Omega$, $\Delta\tau=\Delta T=0,3\mu s$, obliczony zgodnie ze wzorem (7.19), powinien być mniejszy od 10,2% (rys. 6.27a). W przypadku zwiększenia wartości impedancji wzorcowej Z_{wz} do 4Ω , całkowity błąd wzorcowania $\delta Z_{\max w \psi}$ znacznie zmniejszy się i nie powinien przekroczyć 5% (rys. 6.27b).

a)

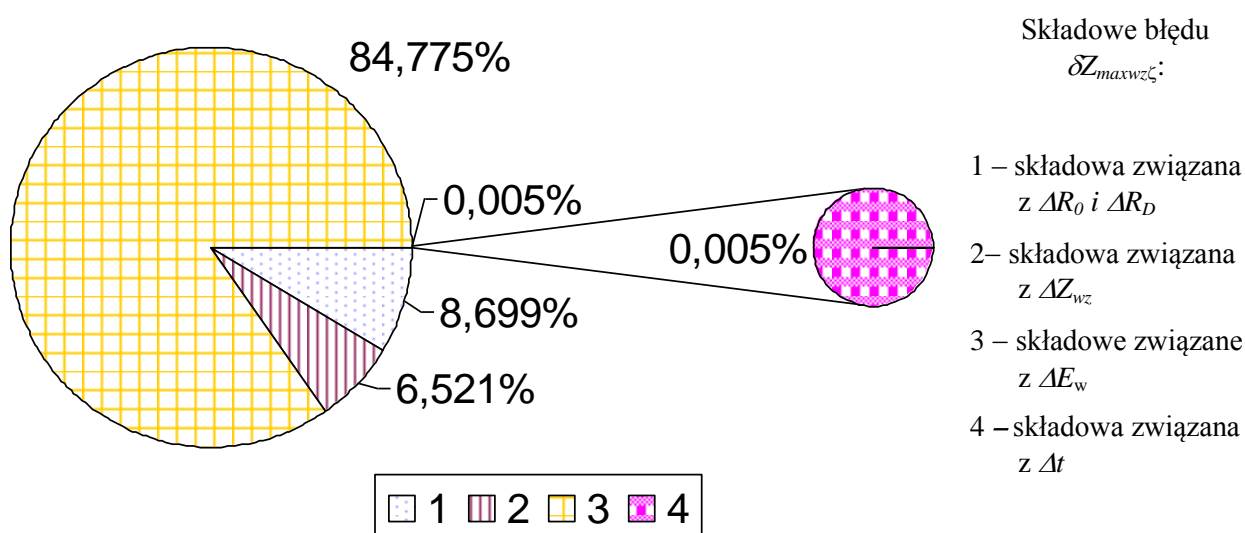


b)



Rys. 6.27. Błąd $\delta Z_{maxwz\psi} = f(\phi_w)$ dla danych: $E_z=230V$, $R_D=R_0=4\Omega$, $\Delta E_\psi=\Delta U_\psi=1,54V$, $\Delta R_D=\Delta R_0=0,02\Omega$, $\Delta Z_{wz}=0,005\Omega$, $\Delta\phi_{wz}=5^\circ$, $\Delta\tau=\Delta T=0,3\mu s$, a) $Z_{wz}=1\Omega$, b) $Z_{wz}=4\Omega$

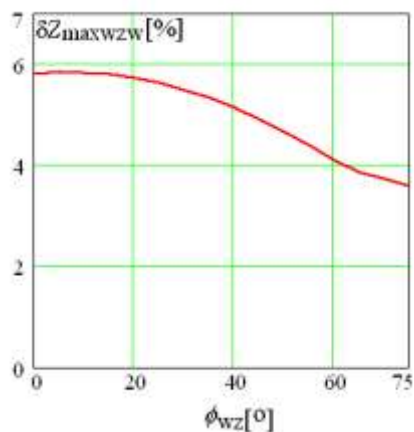
Przeprowadzona analiza wrażliwości układu do wzorcowania dowodzi, że gdy wzorcowany jest miernik działający w oparciu o metodę wektorową, największy wpływ na dokładność wzorcowania ma (w kolejności malejącej): błąd pomiaru napięcia ΔE_w , tolerancja wykonania rezystorów obciążenia pomiarowego sprawdzanego przyrządu R_0 i członu dopełniającego R_D , tolerancja wykonania impedancji wzorcowej Z_{wz} i argumentu ϕ_{wz} (rys. 6.28).



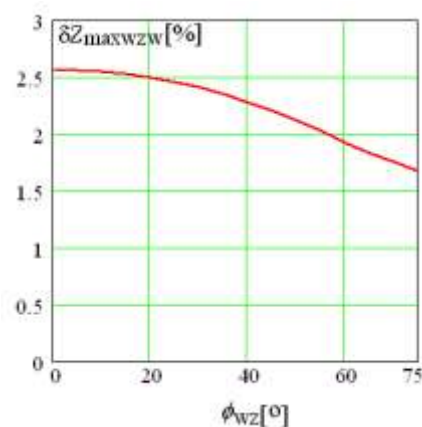
Rys. 6.28. Szacunek udziałów poszczególnych składowych błędów pomiaru impedancji pętli zwarciowej $\delta Z_{maxwz\psi}$ w układzie do wzorcowania mierników działających zgodnie z metodą wektorową dla przyjętych parametrów: $E_z=230V$, $Z_{wz}=1\Omega$, $R_0=4\Omega$, $\Delta R_0=\Delta R_D=0,02\Omega$, $\Delta E_\psi=\Delta U_\psi=1,54V$, $\Delta t=0,5\mu s$, $\Delta Z_{wz}=0,005\Omega$

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

a)



b)



Rys. 6.29. Błąd $\delta Z_{\max wzw} = f(\phi_{wz})$ dla danych: $E_z = 230V$, $R_D = R_0 = 4\Omega$, $\Delta E_w = 0,8V$, $\Delta R_D = \Delta R_0 = 0,02\Omega$, $\Delta Z_{wz} = 0,005\Omega$, $\Delta \phi_{wz} = 5^\circ$, $\Delta T = 0,3\mu s$, $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t_4 = 0,5\mu s$, 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 ψ i metoda wektorowa), pozwala sprawdzać mierniki niezależnie od wartości impedancji wewnętrznej źródła.

Przeprowadzone, liczne analizy tego układu dowodzą, że ze względu na dokładność procesu wzorcowania w tym układzie szczególnie starannie należy dobrać rezystor członu dopełniającego tak aby jego wartość była możliwie jak najbliższa wartości rezystora obciążenia pomiarowego i by odznaczała się wysoką dokładnością wykonania. Bardzo istotny jest również dokładny 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, o tym 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 impedancji wzorcowej Z_{wz} .

Błąd procesu wzorcowania, gdy rolę impedancji wzorcowej Z_{wz} pełni rezystor normalny, niezależnie od metody działania miernika (czy jest to metoda z przesunięciem ψ czy też metoda wektorowa), nie przekracza 0,2%.

7. Koncepcja miernika impedancji pętli zintegrowanego z układem do wzorcowania

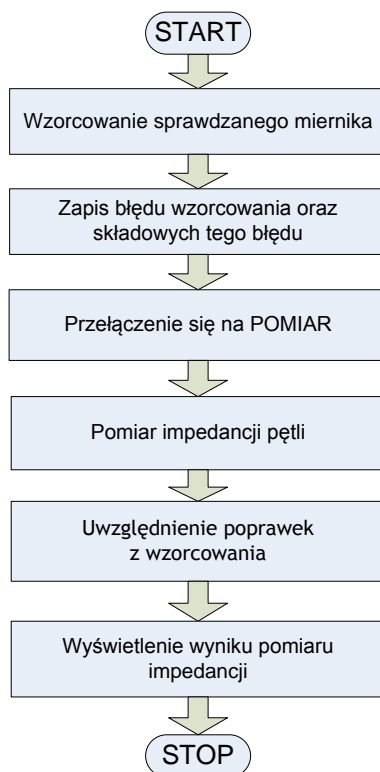
Na podstawie przeprowadzonych badań, zarówno miernika do pomiaru impedancji pętli działającego zgodnie z metodą z przesunięciem ψ oraz metodą wektorową oraz układu do wzorcowania tych mierników, autorka niniejszej rozprawy zaproponowała integrację układu miernika z układem do wzorcowania w docelowym rozwiązaniu zintegrowanego miernika impedancji pętli.

Koncepcja ta ma następujące zalety:

- uproszczenie procesu wzorcowania miernika,
- uniezależnienie dokładności procesu wzorcowania od wartości impedancji wewnętrznej źródła,
- umożliwienie kontroli własności metrologicznych przyrządu u użytkownika,
- podniesienie dokładności pomiaru.

Budowa zintegrowanego miernika impedancji pętli jest analogiczna do przedstawionego na rysunku 6.21 z rozdziału 6.4. Różnica w stosunku do opisanego w rozdziale 6.4. układu wzorcowania a proponowanym miernikiem zintegrowanym polega na rozbudowie funkcji oprogramowania i odmiennej fizycznej realizacji – w postaci jednego urządzenia.

Algorytm działania oprogramowania zintegrowanego miernika został przedstawiony na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Algorytm działania zintegrowanego miernika impedancji pętli zwarciowej

W celu przeprowadzenia wzorcowania miernika impedancji pętli najpierw należy do zacisków zewnętrznego źródła zasilania podłączyć generator sinusoidy (umożliwiający generację napięcia o amplitudzie 230V i częstotliwości 50Hz.). Następną czynnością jest przeprowadzenie procesu wzorcowania miernika za pomocą specjalizowanego oprogramowania, które zapisze wyniki sprawdzania przyrządu oraz składowe błędy wzorcowania na dysku.

Kolejnym etapem jest przełączenie w tryb POMIAR. Do zacisków źródła E_z należy podłączyć mierzone napięcie sieci (max. 230V), której impedancję mierzymy. Następnie za pomocą kolejnego programu zostaje zmierzona impedancja pętli. Oprogramowanie to uwzględni również wyniki etapu wzorcowania przed wyświetleniem wyniku pomiaru impedancji pętli zwarciowej.

Przeprowadzono przykładowe szacunki polepszenia dokładności pomiaru impedancji pętli, w przypadku gdy pomiar impedancji został wykonany zintegrowanym miernikiem impedancji pętli. Wyniki te zostały przedstawione w tablicy 7.1.

Oszacowanie to wykonano przy następujących założeniach:

- pomiar impedancji pętli przeprowadzono miernikiem impedancji pętli działającym zgodnie z metodą z przesunięciem ψ (MIP ψ) oraz zintegrowanym z układem do wzorcowania miernikiem działającym w oparciu o tę samą metodę (MIPZ ψ),
- pomiar obydwoma przyrządami wykonywany był w tym samym punkcie sieci, przy takich samych warunkach: $E_z=230V$, $Z=1\Omega$, $\phi=75^\circ$, krzywa napięcia odkształcona tak jak na rysunku 4.8, obciążenie robocze $Z_s=1000\Omega$ i $\phi_s=75^\circ$.
- rezystancja obciążenia pomiarowego obu mierników taka sama $R_0=4\Omega$.

Tablica 7.1. Oszacowanie błędu całkowitego δZ_C pomiaru impedancji pętli zwarciowej miernikiem MIP ψ i MIPZ ψ oraz błędu wynikającego z charakteru sieci δZ_A i z budowy miernika oraz metody pomiarowej δZ_B

Lp.	Źródło błędu	MIP ψ [%]	MIPZ ψ [%]
1.	Odkształcenie obciążenia robocze	$\delta Z_{odksz}=0,09$	$\delta Z_{odksz}=0,09$
2.	Obciążenie $Z_s=1000\Omega$, $\phi_s=75^\circ$	$\delta Z_{obciadz}=0,8$	$\delta Z_{obciadz}=0,8$
3.	$\Delta R_0=0,004\Omega$	$\delta Z_{max\psi}=0,1$	—
4.	$\Delta E_\psi=1,54V$ (LEM CV-500 i 6024E)	$\delta Z_{max\psi}=7,5$	—
5.	$\Delta T=0,3\mu s$	$\delta Z_{max\psi}=0,0015$	—
6.	$\Delta \tau=0,3\mu s$	$\delta Z_{max\psi}=0,04$	—
7.	δZ_A [%]	0,89	0,89
8.	δZ_B [%]	7,65	0
9.	δZ_C [%]	8,54	0,89

Tablica 7.1 pokazuje, że zastosowanie zintegrowanego miernika impedancji pętli z układem wzorcowym niewątpliwie podnosi dokładność pomiaru, dzięki redukcji składowego błędu pomiaru wynikającego z budowy miernika i zastosowanej metody – δZ_B .

Ponadto, zostają wyeliminowane przekłamania, jakie mogą pojawić się w wynikach pomiarów miernikiem, który uległ uszkodzeniu w trakcie eksploatacji w sposób niezauważalny dla obsługi.

8. Podsumowanie, wnioski końcowe i najważniejsze osiągnięcia

Przedstawiona rozprawa doktorska 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 (rozd. 3) dokonana przez autorkę rozprawy wykazała, że błąd pomiaru impedancji tymi metodami może osiągać wartości niedopuszczalne.

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

W pracy przedstawiono podstawy teoretyczne tych metod oraz wyniki przeprowadzonych przez autorkę rozprawy badań symulacyjnych obu metod (rozd. 4), które dowiodły, że obie metody pozwalają na dokładniejszy pomiar impedancji pętli zwarcia niż metody klasyczne z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym oraz pozwoliły sprecyzować zasadę wyboru metody w zależności od parametrów sieci zasilającej.

Autorka rozprawy zaprojektowała, zbudowała i przeprowadziła badania eksperymentalne fizycznego modelu miernika realizującego pomiar zarówno metodą z przesunięciem ψ jak i metodą wektorową (rozd.5). Głównymi elementami miernika są: specjalistyczna karta pomiarowa, przetwornik napięcia, człon obciążenia pomiarowego oraz oprogramowanie. Natomiast w skład stanowiska badawczego oprócz miernika wchodził jeszcze model sieci elektroenergetycznej. Autorka rozprawy przeprowadziła szereg badań miernika. Uzyskano zbieżność wyników uzyskanych z analiz symulacyjnych i doświadczalnych.

Opracowano, wykonano i przeprowadzono badania symulacyjne i eksperymentalne urządzenia do wzorcowania mierników (rozd. 6), w których mierzoną impedancję wyznacza się na podstawie składowych ortogonalnych napięcia. Uzyskane wyniki z badań symulacyjnych i eksperymentalnych potwierdziły, że urządzenie to pozwala na wzorcowanie mierników impedancji pętli zwarcia eliminując wpływ impedancji źródła na wynik pomiaru.

Wyniki badań fizycznego miernika impedancji pętli oraz układu do wzorcowania zaowocowały nowatorską koncepcją zintegrowanego miernika impedancji pętli z układem do wzorcowania (rozdz. 7), co może pozwolić na utworzenie nowej klasy mierników. Zaletami tego rozwiązania jest: uproszczenie procesu wzorcowania miernika, możliwość samodzielnego sprawdzania własności metrologicznych przyrządu w trakcie jego eksploatacji przez użytkownika, co w efekcie podniesie dokładność pomiarów dla celów ochrony przeciwporażeniowej.

Przeprowadzone w niniejszej rozprawie badania pozwoliły sprecyzować zasady wyboru metody pomiarowej, a także opracować miernik impedancji pętli zwarciowej z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym o lepszych parametrach metrologicznych niż dotychczasowe przyrządy, działające w oparciu o metody klasyczne. Opracowano i zbudowano układ do wzorcowania mierników, w których impedancja pętli zwarciowej wyznaczana jest na podstawie składowych ortogonalnych fazora napięcia.

Można zatem uznać, że postawione tezy pracy zostały udowodnione.

8.1. Wnioski końcowe

- Zarówno w metodzie z przesunięciem ψ jak i 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 powinno się stosować w miejscu, gdzie krzywa napięcia jest bliska sinusoidzie. W przypadku pomiaru impedancji pętli w punkcie pomiarowym, w którym występują silne odkształcenia krzywej napięcia, bardziej dokładną okaże się metoda z przesunięciem ψ ,
- 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 ψ jak i metodą wektorową związana jest głównie z błędem pomiaru napięcia, tolerancją wykonania obciążenia pomiarowego oraz dokładnością wyznaczenia przesunięcia między napięciami ψ w przypadku metody z przesunięciem ψ .
- Badania symulacyjne i eksperymentalne układu do wzorcowania dowiodły, iż w układzie tym eliminowany jest wpływ impedancji źródła zasilania na wynik pomiaru. Błąd procesu wzorcowania, gdy rolę wzorca pełni rezystor normalny, nie przekracza 0,2%.

8.2. Najważniejsze osiągnięcia autorki

Do najważniejszych osiągnięć pracy, zdaniem autorki, należy zaliczyć:

- przeprowadzenie dogłębnej analizy metrologicznej metody z przesunięciem ψ i metody wektorowej, dzięki czemu sprecyzowano zasady wyboru metody pomiarowej w zależności od parametrów sieci oraz poszerzono stan wiedzy na temat właściwości metrologicznych obu metod pomiaru impedancji pętli,
- opracowanie i zbudowanie fizycznego modelu miernika impedancji pętli zwarciowej realizującego obie metody oraz przeprowadzenie jego badań eksperymentalnych,
- opracowanie i wykonanie analizy metrologicznej układu do wzorcowania mierników impedancji pętli działających zgodnie z metodą z przesunięciem ψ i metodą wektorową,
- budowę i oprogramowanie układu do wzorcowania oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych,
- opracowanie koncepcji miernika impedancji pętli zintegrowanego z układem do wzorcowania oraz procedury pomiarowej.

8.3. Kierunki dalszych badań

Dalsze prace związane z tematyką rozprawy zdaniem autorki powinny być prowadzone w kierunku:

- skonstruowania prototypowego mikroprocesorowego miernika zintegrowanego z układem do wzorcowania, który umożliwiłby pomiar impedancji pętli metodą z przesunięciem ψ i/lub metodą wektorową w warunkach terenowych,
- przeprowadzenie badań laboratoryjnych i eksploatacyjnych prototypu mikroprocesorowego zintegrowanego miernika impedancji pętli.

9. Literatura

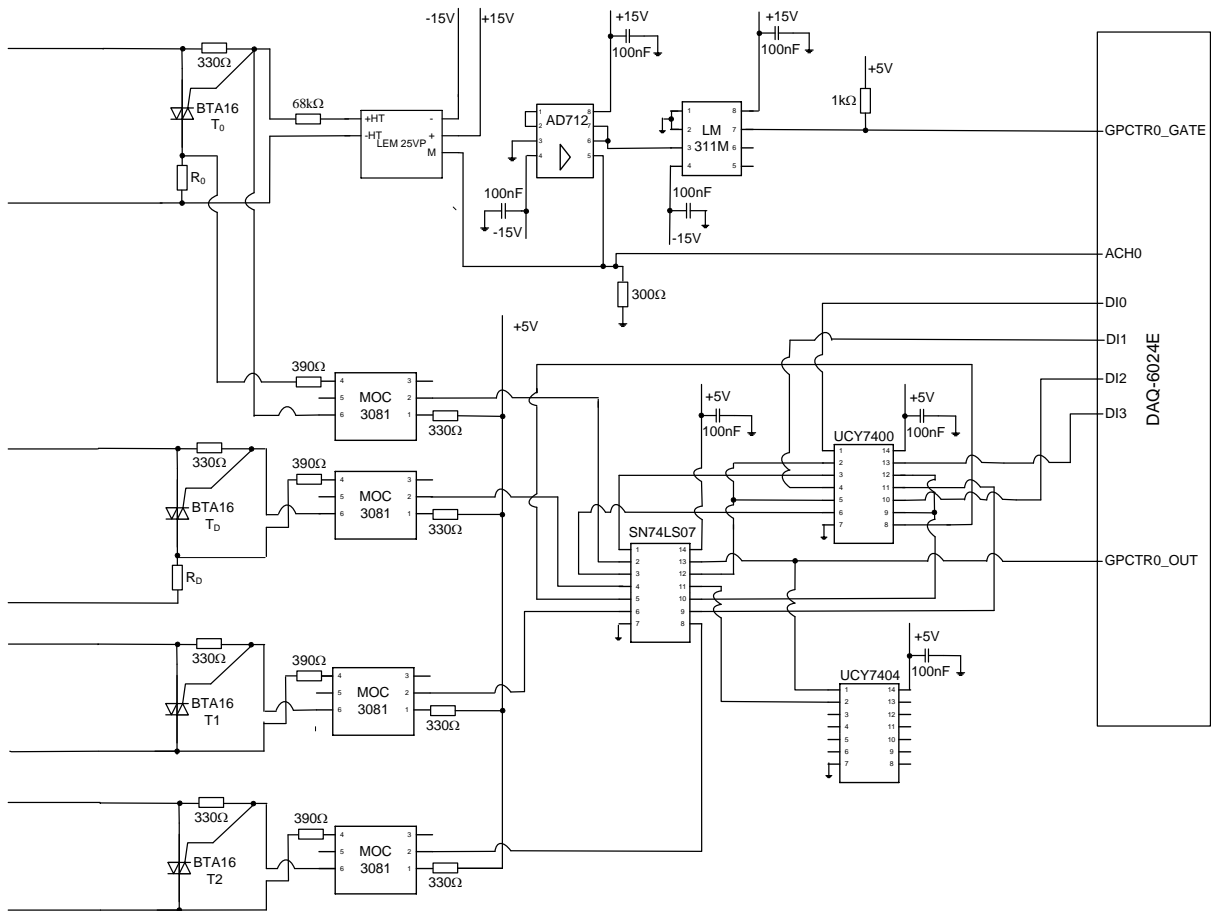
1. Bielański K.: *Sposób i badania skuteczności zerowania lub uziemienia w urządzeniach elektrycznych oraz urządzenie do stosowania tego sposobu*. Patent nr 45296, 1961.
2. Bielański K.: *Metoda pomiaru oporności i reaktancji pętli zwarciowej zerowania i uziemienia*. Część I, Energetyka nr 6/1965, s.179-180; część II Energetyka nr 7/1965, s.217-220.
3. Cegielski M.: *Metoda pośredniego pomiaru impedancji pętli zwarciowej*. Część I, prace Instytut Automatyki Systemów Energetycznych, nr 1/1964, s.211-227.
4. 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.
5. Czapp S.: *Metoda wektorowa pomiaru impedancji pętli zwarciowej w obecności zakłóceń*. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, promotor Ryszard Roskosz, Gdańsk 2002.
6. Danzer P., Vierfuss H.: *Beitrag zur Messung der Impedenzen von Niederspannungsnetzen*. ETZ-A, 87, nr 5, 1966.
7. Danzer P.: *Impedance measurement in low voltage systems*. Proc. Of 5th International Symposium on Short Circuit, vol. 1, Warsaw, 1992.
8. DIN 57413 Teil3. Deutsche Normen Schleifenwiderstands – Messerate.
9. Dobrzański A., Nawrocki Z.: *Urządzenie do wzorcowania mierników rezystancji lub impedancji obwodu zwarciowego*. Patent nr 176231z dn.06.06.1995.
10. Dobrzański A., Nawrocki Z.: *Układy i urządzenia do wzorcowania mierników impedancji obwodu zwarciowego*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 7/1995, s. 178-181.
11. 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*.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Havelka F.: *Novy sposob pro rychlon a spolechtivon kontrolu nulowani*. Energetika, z. 3/1953.
16. Iwicki M.: *Nowy przyrząd do kontroli rezystancji pętli zwarciowej i sprawdzania prawidłowości połączeń ochronnych*. Wiadomości Elektrotechniczne 10/1971.
17. 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.
18. Iwicki M., Roskosz R.: *Urządzenie do bezpośredniego pomiaru rezystancji pętli zwarciowej w elektrycznych instalacjach niskiego napięcia*. Nr patentu 75219 z dn. 25.03.1972.
19. Kalus-Jęcek B., Kuśmierk Z.: *Wzorce wielkości elektrycznych i ocena niepewności pomiaru*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000.
20. Kluger A., Skubis T.: *Programowany wzorzec wartości skutecznej napięcia przemiennego*. Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemysle SP '2000, Materiały konferencyjne, Zielona Góra 2000, s. 151.
21. Kuśmierk Z., Groszek S.: *Technika pomiarów i badań urządzeń elektroenergetycznych*.

- Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.
22. Markiewicz H.: *Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
 23. 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.
 24. Masny J.: *Krytyczna ocena metod pomiaru impedancji pętli zwarciovych*. Praca Naukowe Instytutu Energoelektroniki Politechniki Wrocławskiej nr 28/1975.
 25. Masny J.: *Pomiary impedancji pętli zwarciovych*. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 10/1987, s.16-21.
 26. Mindykowski J.: *Ocena jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych z układami przekształtnikowymi*. Polska Akademia Nauk Komitet Elektrotechniki. Seria Wydawnicza Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki, Okrętownictwo i Żegluga sp. z o.o., tom 44, Gdańsk 2001.
 27. Musiał E.: *Jak unikać błędów przy badaniu skuteczności uzemień ochronnych i zerowania w instalacjach 380/220V*. Gospodarka Paliwami i Energią. Zeszyt 12/1965, s.393-399.
 28. Musiał E.: *Zagrożenia pochodzące od urządzeń elektrycznych*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1992.
 29. 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..
 30. Musiał E.: *Instalacje i urządzenia elektroenergetyczne*. WSP, Warszawa 1998.
 31. 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.
 32. Nawrocki Z.: *Urządzenie do pomiaru impedancji pętli zwarciovych*. Nr patentu 128417 z dn. 15.07.1985.
 33. Nawrocki Z.: *Urządzenie do pomiaru impedancji pętli zwarciovych*. Nr patentu 129468 z dn. 15.07.1985.
 34. Nawrocki Z.: *Urządzenie do pomiaru impedancji pętli zwarciovych*. Nr patentu 128597 z dn. 15.07.1985.
 35. 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.
 36. Nawrocki Z.: *Nowa zasada pomiaru impedancji obwodu zwarciovych*. Przegląd Elektrotechniczny nr 7/1988, s.199-201.
 37. Nawrocki Z., Dobrzański A., Tyliński A.: *Wykorzystanie inżynierii metoda pomiarowych przy projektowaniu miernika do pomiaru impedancji obwodu zwarciovych*. Przegląd Elektrotechniczny nr 9/1994, s.233-236.
 38. Nawrocki Z., Stafiniak A.: *Analiza metrologiczna cyfrowego miernika impedancji obwodu zwarciovych*. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna *Bezpieczeństwo elektryczne*. Tom I, Wrocław, 1999, s.425-431.
 39. Nawrocki Z.: *Urządzenie do pomiaru impedancji obwodu zwarciovych*. Nr patentu 179242 z dn. 31.08.2000.
 40. Nawrocki Z., Stafiniak A.: *Sprawdź swój miernik impedancji lub rezystancji pętli zwarciovych*. elektro.info nr 11/2004, s.30-34.
 41. Norma PN-IEC 60364-6-61:2000 *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Sprawdzanie, Sprawdzenia odbiorcze*.
 42. Norma PN-EN 50160:2002 *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*.
 43. Nowotny M., Sedlacek M.: *New Class of Time Domain Algorithms of RMS Value Measurement of Non-Coherently Sampled Signals*. 14th IMEKO Symposium on New Technologies in Measurement and Instrumentation and 10th Workshop on ADC Modelling and Testing, vol. I, Gdynia 2005, p. 235-240.
 44. Pawłowski E., Referowski L., Świsulski D.: *Sprawdzenie częstościomierzy cyfrowych*

- w układzie z odbiornikiem częstotliwości wzorcowej DCF77. Przegląd Elektrotechniczny 5/2002, s.163-167.
45. Piasecki J. *Uproszczone obliczanie prądów zwarciovych w niskonapięciowych instalacjach zakładów przemysłowych*. Gospodarka Paliwami i Energią nr 6/1968, s.1-5.
 46. Prawdzik P.: *Urządzenie do skalowania mierników rezystancji i impedancji pętli zwarciovych*. Patent nr 122493 1985.
 47. Roskosz R., Swędrowski L., Lewandowski J.: *Nowa metoda pomiaru rezystancji pętli zwarciovych w urządzeniach elektrycznych niskiego napięcia*. Przegląd Elektrotechniczny nr 5/1973, s. 201-204.
 48. Roskosz R.: *Podstawowe cechy mierników impedancji pętli zwarciovych*. Przegląd Elektrotechniczny nr 10/1988, s.317-319.
 49. Roskosz R.: *Błędy w pomiarach impedancji pętli zwarciovych wynikające z krótkotrwałego przepływu prądu pomiarowego*. XVII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów. Materiały pokonferencyjne, Politechnika Poznańska, Poznań 1985, tom II, s.121-126.
 50. Roskosz R.: *Przyrządy typu MR do pomiaru impedancji pętli zwarciovych*, 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 zwarciovych z eliminacją wpływu wybranych harmonicznych 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 zwarciovych*. Patent RP nr 159 333 z dn. 31.12.1992.
 55. Roskosz R.: *Nowe rozwiązania pomiaru impedancji pętli zwarciovych przy odkształceniu krzywej napięcia w miejscu badania*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka nr 79, Gdańsk 1995.
 56. Roskosz R., Czapp S., Galla S., Golijanek-Jędrzejczyk A.: *Sposób i układ do pomiaru składowych ortogonalnych oraz modułu wektora impedancji pętli zwarciovych*. Nr zgł. P-355349 z dnia 2002.08.08.
 57. Roskosz R, Swędrowski L., Golijanek-Jędrzejczyk A., Świsulski D.: *Sposób i urządzenie do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciovych z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym*. Zgłoszenie patentowe.
 58. Sawicki J.: *Sposób i urządzenie do skalowania mierników rezystancji lub impedancji pętli zwarciovych*. Patent 92351 z dn. 31.01.1976.
 59. Sawicki J., Roskosz R.: *Układ do sprawdzania mierników rezystancji zwarciovych*. Sympozjum Naukowo-Techniczne w MERA-ZSM, Warszawa 1976, s.1-8.
 60. Swędrowski L., Roskosz R.: *Urządzenie do bezpośredniego pomiaru rezystancji pętli zwarciovych w elektrycznych sieciach niskiego napięcia*. Patent nr 73243 z dn. 15.10.1976.
 61. Stafiniak A.: *Źródła błędów w pomiarach impedancji pętli zwarciovych*. XXXII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów, Rzeszów 2000, s.525-530.
 62. Stafiniak A.: *Metoda pomiaru małych wartości impedancji obwodu zwarciovych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, promotor Zdzisław Nawrocki, Wrocław 2002.
 63. Stafiniak A.: *Analiza metrologiczna metod pomiaru impedancji pętli zwarciovych przy wykorzystaniu przetworników analogowych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wroclawskiej nr 54/2003, s.335-350.
 64. Streuber M.: *Beitrag zur indirekten Messung der Kurzschlussstromen in Drehstrom-Niederspannungsanlagen der Industrie*. Elektrie, z. 6/1968.
 65. 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.
 66. Szafran J., Wiszniewski A.: *Algorytmy pomiarowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
 67. Świsulski D.: *Analiza dokładności cyfrowego pomiaru okresu zakłóconego napięcia*

- sinusoidalnego w warunkach dynamicznych*. Krajowy Kongres Metrologii KKM '2001, Warszawa 2001, s. 497-500.
68. Tagg A.: *The measurement of earth loop resistance*. IEEE Proceed., vol. 104, no 15/1957.
 69. Taylor John R.: *Wstęp do analizy błęd pomiarowego*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
 70. Teresiak Z.: *Metody pomiarów oporności pętli zwarciowej zerowania ochronnego*. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 11/1963, s.135-139.
 71. 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 .
 72. 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.
 73. Ter-Oganesjan J.: *O principle postrojenia schem proborow dla izmierenija petli faza-nul*. Promysznaja Eneretika, nr 4/1957.
 74. Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o zmianie ustawy prawo budowlane (Dz. U. Nr 93 poz. 888) artykuł 62 pkt 1 ust. 2.
 75. Wieloarkuszowa norma PN-EN 61557 *Bezpieczeństwo elektryczne w niskonapięciowych sieciach elektroenergetycznych o napięciach- przemiennych do 1kV i stałych do 1,5kV*.
 76. Katalog firmy Dacpol: *Podzespołu dla elektroenergetyki*. 2002
 77. Katalog firmy National Instruments, 2001.

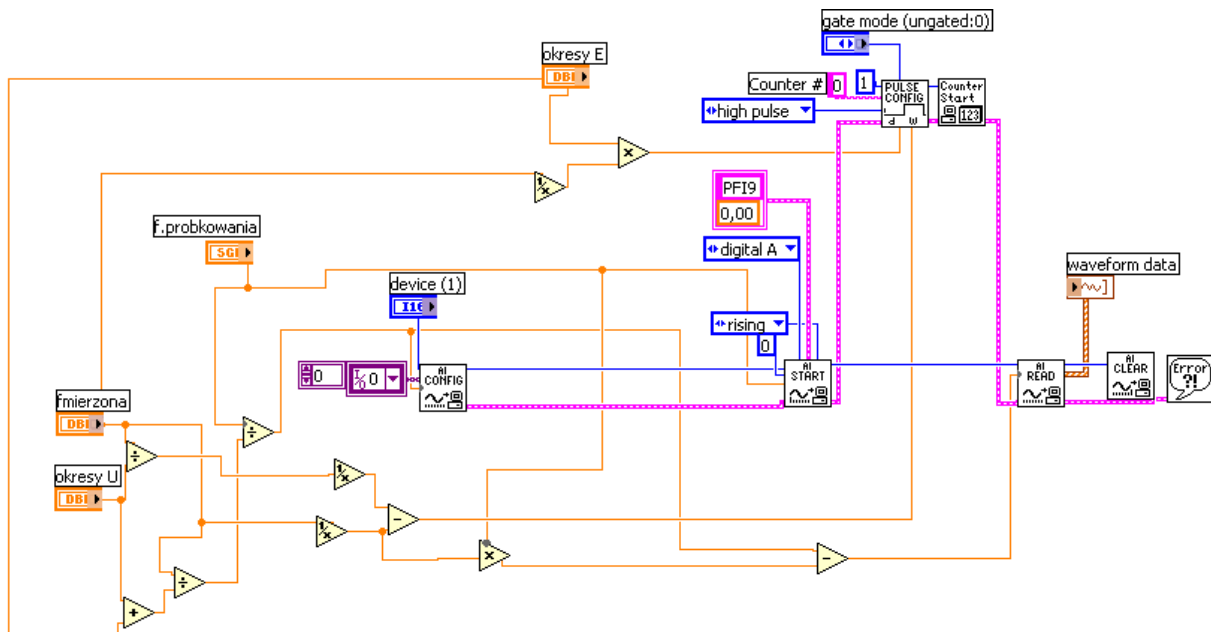
Załącznik 1



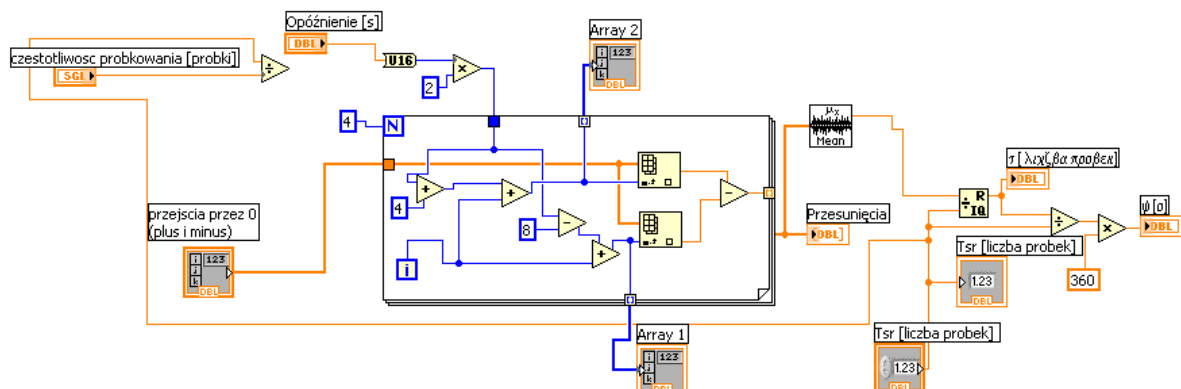
Rys. 1. Schemat ideowy układu do wzorcowania wraz z układem miernika impedancji pętli zwarciowej

Załącznik 2

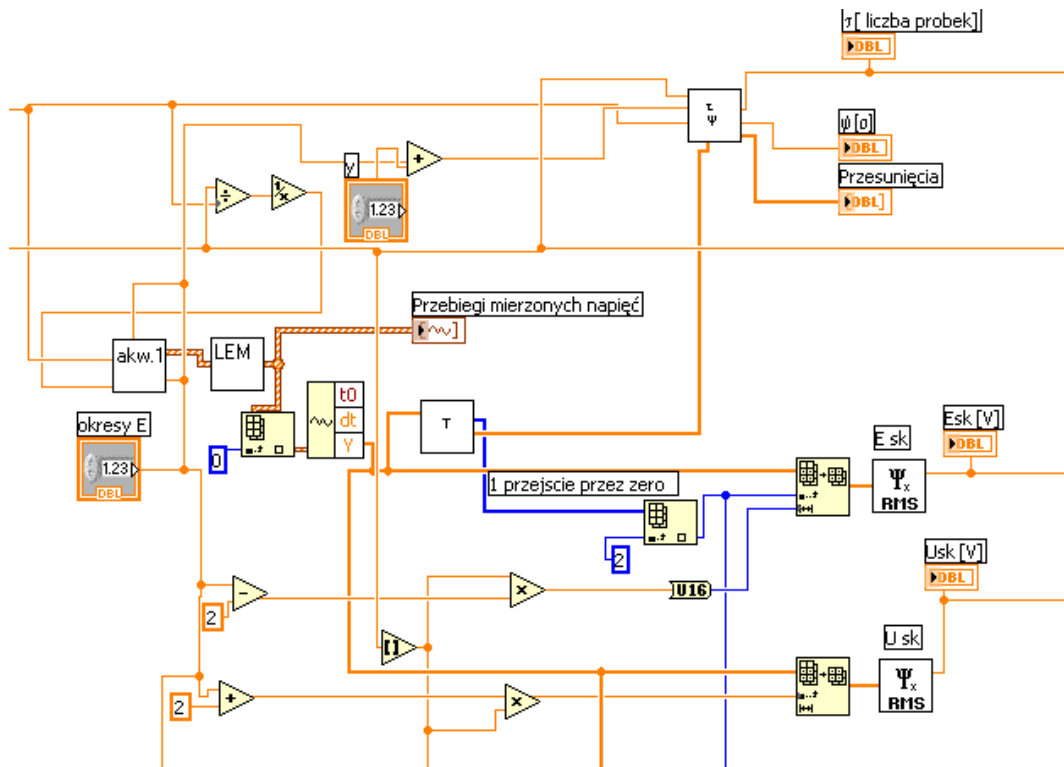
W załączniku 2 przedstawiono fragmenty oprogramowania miernika impedancji pętli oraz układu do wzorcowania.



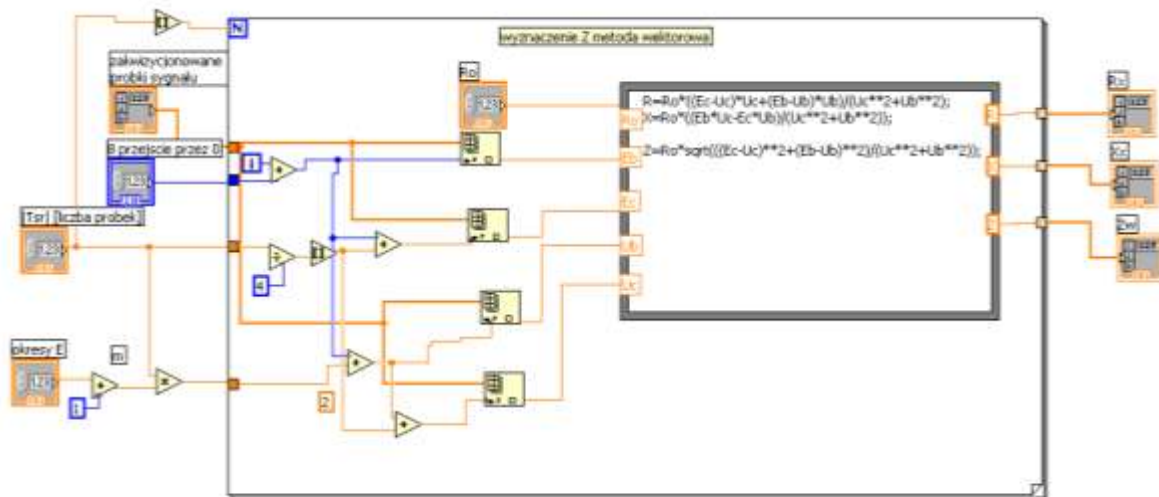
Rys. 1. Fragment programu dotyczący akwizycji mierzonego sygnału oraz ustawienia oraz ustawienia czasu i trybu załączenia licznika



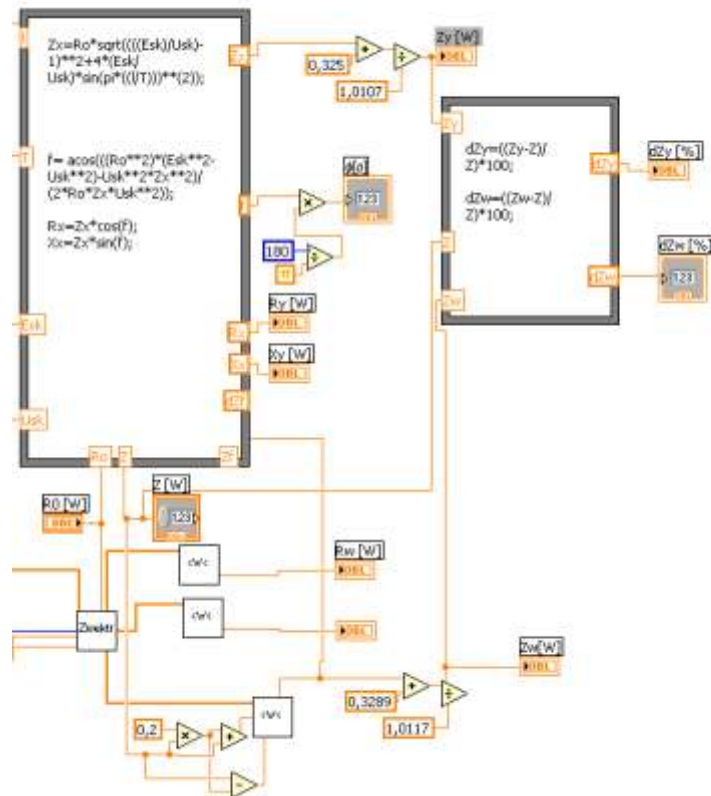
Rys. 2. Podprogram mający na celu wyznaczenie przesunięcia τ między mierzonymi napięciami



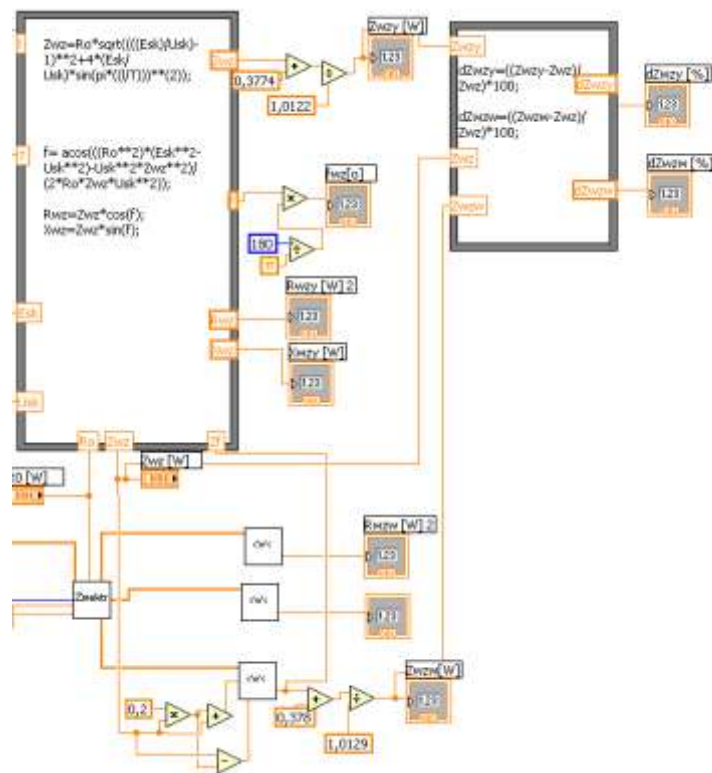
Rys. 3. Struktura programu pomiaru wartości skutecznych napięcia



Rys. 4. Podprogram wyznaczający wartość impedancję pętli zgodnie z metodą wektorową



Rys. 5. Struktura programu wyznaczająca wartość impedancję pętli zgodnie z metodą Z przesunięciem ψ oraz obliczająca błąd pomiaru dla obu metod



Rys. 6. Struktura programu układu miernika do wzorcowania, w którym wyznaczone zostają wartości impedancji $Z_{wz\psi}$ i Z_{wz} , ich składowe rezystancja i reaktancja oraz błędy pomiaru

Załącznik 3

Część A – wyniki kalibracji miernika impedancji pętli

Tablica A.1. Wyniki pomiarów rezystancji miernikiem impedancji pętli przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych: $E_z=230$, rolę impedancji pełnią rezystory normalne równe $R=5,005\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
	$Z_{\psi m} [\Omega]$	$\delta Z_{\psi m} [\%]$	$Z_{wm} [\Omega]$	$\delta Z_{wm} [\%]$
1.	4,718	-5,74	4,708	-5,93
2.	4,718	-5,74	4,723	-5,63
3.	4,72	-5,69	4,714	-5,8
4.	4,719	-5,71	4,723	-5,63
5.	4,717	-5,74	4,724	-5,62
6.	4,719	-5,71	4,724	-5,61
7.	4,721	-5,68	4,717	-5,74
8.	4,716	-5,77	4,719	-5,71
9.	4,717	-5,76	4,729	-5,51
10.	4,717	-5,76	4,72	-5,69

Tablica A.2. Wyniki pomiarów rezystancji miernikiem impedancji pętli przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych: $E_z=230$, rolę impedancji pełnią rezystory normalne równe $R=10,0134\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
	$Z_{\psi m} [\Omega]$	$\delta Z_{\psi m} [\%]$	$Z_{wm} [\Omega]$	$\delta Z_{wm} [\%]$
1.	9,808	-1,92	9,823	-1,76
2.	9,806	-1,94	9,808	-1,92
3.	9,805	1,95	9,807	-1,93
4.	9,804	-1,96	9,82	-1,79
5.	9,804	-1,96	9,806	-1,94
6.	9,804	-1,96	9,818	-1,81
7.	9,805	-1,95	9,814	-1,85
8.	9,805	-1,95	9,796	-2,03
9.	9,805	-1,95	9,809	-1,9
10.	9,805	-1,95	9,81	-1,9

Tablica A.3. Wyniki pomiarów rezystancji miernikiem impedancji pętli przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych: $E_z=230$, rolę impedancji pełnią rezystory normalne równe $R=20,026\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
	$Z_{\psi m} [\Omega]$	$\delta Z_{\psi m} [\%]$	$Z_{wm} [\Omega]$	$\delta Z_{wm} [\%]$
1.	19,934	-0,45	19,954	-0,34
2.	19,935	-0,44	19,974	-0,24
3.	19,932	-0,46	19,942	-0,4
4.	19,931	-0,46	19,94	-0,41
5.	19,931	-0,46	19,938	-0,42
6.	19,933	-0,45	19,938	-0,4
7.	19,931	-0,46	19,943	-0,37
8.	19,933	-0,45	19,949	-0,35
9.	19,934	-0,45	19,952	-0,32
10.	19,929	-0,47	19,958	-0,42

Tablica A.4. Wyniki pomiarów rezystancji miernikiem impedancji pętli przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych: $E_z=230$, rolę impedancji pełnią rezystory normalne równe $R=30,03\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
	$Z_{\psi m} [\Omega]$	$\delta Z_{\psi m} [\%]$	$Z_{wm} [\Omega]$	$\delta Z_{wm} [\%]$
1.	30,014	-0,05	30,035	0,016
2.	30,015	-0,05	30,056	0,086
3.	30,013	-0,06	30,06	0,1
4.	30,014	-0,05	30,03	0,001
5.	30,011	-0,06	30,057	0,091
6.	30,017	-0,04	30,067	0,122
7.	30,014	-0,05	29,977	-0,17
8.	30,014	-0,05	30,043	0,043
9.	30,015	-0,05	30,055	0,082
10.	30,016	-0,05	30,04	0,032

Część B – przykładowe wyniki pomiarów impedancji pętli miernikiem (z korekcją)

Tablica B.1. Wyniki pomiarów rezystancji miernikiem impedancji pętli przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych: $E_z=230$, rolę impedancji pełni rezystor normalny równy $R=10,0134\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
	$Z_{\psi m} [\Omega]$	$\delta Z_{\psi m} [\%]$	$Z_{wm} [\Omega]$	$\delta Z_{wm} [\%]$
1.	10,025	0,15	10,02	0,126
2.	10,025	0,15	10,01	0
3.	10,023	0,13	10,03	0,162
4.	10,023	0,13	10,02	0,126
5.	10,025	0,15	10,02	0,126
6.	10,025	0,15	10,02	0,126
7.	10,021	0,11	10,03	0,162
8.	10,025	0,15	10,02	0,126
9.	10,025	0,15	10,03	0,162
10.	10,023	0,13	10,02	0,126

Tablica B.2. Wyniki pomiarów rezystancji miernikiem impedancji pętli przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych: $E_z=230$, $Z=10,17\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	$\phi [^\circ]$	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
		$Z_{\psi m} [\Omega]$	$\delta Z_{\psi m} [\%]$	$Z_{wm} [\Omega]$	$\delta Z_{wm} [\%]$
1.	0	10,117	-0,52	10,12	-0,49
2.	10	10,069	-0,99	10,077	-0,9
3.	15	10,18	0,09	10,172	0,014
4.	20	10,11	-0,59	10,109	-0,59
5.	25	10,06	-1,08	10,058	-1,12
6.	30	10,104	-0,65	10,103	-0,66
7.	35	10,104	-0,65	10,126	-0,43
8.	40	10,146	-0,23	10,141	-0,28
9.	45	10,143	-0,26	10,126	-0,42
10.	50	10,17	0	10,196	0,251
11.	55	10,167	-0,03	10,208	0,369
12.	60	10,2	0,3	10,208	0,372
13.	65	10,229	0,58	10,259	0,871
14.	70	10,267	0,95	10,269	0,969
15.	75	10,259	0,87	10,301	1,292

Tablica B.3. Wyniki pomiarów rezystancji miernikiem impedancji pętli przy odkształconej krzywej napięcia (THD=8%) i dla danych: $E_z=230$, $Z=10,17\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	$\phi [^\circ]$	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
		$Z_{\psi m} [\Omega]$	$\delta Z_{\psi m} [\%]$	$Z_{wm} [\Omega]$	$\delta Z_{wm} [\%]$
1.	0	10,112	-0,57	10,111	-0,58
2.	10	10,071	-0,97	10,083	-0,85
3.	15	10,178	0,08	10,182	0,117
4.	20	10,125	0,23	10,194	0,236
5.	25	10,074	-0,94	10,078	-0,9
6.	30	10,094	-0,75	10,105	-0,63
7.	35	10,134	-0,35	10,125	-0,44
8.	40	10,142	-0,28	10,143	-0,26
9.	45	10,158	-0,12	10,157	-0,13
10.	50	10,169	-0,01	10,189	0,19
11.	55	10,199	0,29	10,205	0,347
12.	60	10,226	0,55	10,23	0,591
13.	65	10,268	0,97	10,296	1,043
14.	70	10,245	0,74	10,323	1,5
15.	75	10,275	1,03	10,421	2,468

Część C – wyniki kalibracji układu do wzorcowania mierników impedancji pętli

Tablica C.1. Wyniki kalibracji układu do wzorcowania MIP przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych: $E_z=230$, rolę impedancji wzorcowej Z_{wz} pełnią rezystory normalne równe $R=5,005\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
	$Z_{wz\psi} [\Omega]$	$\delta Z_{wz\psi} [\%]$	$Z_{wzw} [\Omega]$	$\delta Z_{wzw} [\%]$
1.	4,675	-6,6	4,68	-6,5
2.	4,677	-6,57	4,682	-6,47
3.	4,674	-6,63	4,681	-6,49
4.	4,673	-6,65	4,681	-6,49
5.	4,679	-6,52	4,671	-6,69
6.	4,675	-6,6	4,679	-6,52
7.	4,674	-6,62	4,675	-6,6
8.	4,674	-6,64	4,678	-6,54
9.	4,674	-6,68	4,675	-6,6
10.	4,673	-6,65	4,675	-6,6

Tablica C.2. Wyniki kalibracji układu do wzorcowania MIP przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych: $E_z=230$, rolę impedancji wzorcowej Z_{wz} pełnią rezystory normalne równe $R=10,0134\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
	$Z_{wz\psi}$ [Ω]	$\delta Z_{wz\psi}$ [%]	Z_{wzw} [Ω]	δZ_{wzw} [%]
1.	9,771	2,42	9,789	-2,24
2.	9,774	-2,4	9,793	-2,2
3.	9,771	-2,42	9,783	-2,3
4.	9,774	-2,39	9,785	-2,28
5.	9,769	-2,44	9,772	-2,41
6.	9,767	-2,46	9,771	-2,41
7.	9,769	-2,44	9,777	-2,35
8.	9,767	-2,46	9,769	-2,44
9.	9,773	-2,4	9,772	-2,4
10.	9,768	-2,45	9,768	-2,44

Tablica C.3. Wyniki kalibracji układu do wzorcowania MIP przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych: $E_z=230$, rolę impedancji wzorcowej Z_{wz} pełnią rezystory normalne równe $R=20,02\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
	$Z_{wz\psi}$ [Ω]	$\delta Z_{wz\psi}$ [%]	Z_{wzw} [Ω]	δZ_{wzw} [%]
1.	19,901	-0,61	19,874	-0,74
2.	19,908	-0,58	19,918	-0,52
3.	19,902	-0,6	19,877	-0,73
4.	19,904	-0,6	19,912	-0,55
5.	19,903	-0,6	19,924	-0,49
6.	19,904	-0,6	19,936	-0,43
7.	19,907	-0,58	19,915	-0,53
8.	19,903	-0,6	19,914	-0,54
9.	19,906	-0,58	19,934	-0,45
10.	19,904	-0,6	19,903	-0,57

Tablica C.4. Wyniki kalibracji układu do wzorcowania MIP przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych: $E_z=230$, rolę impedancji wzorcowej Z_{wz} pełnią rezystory normalne równe $R=30,03\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
	$Z_{wz\psi} [\Omega]$	$\delta Z_{wz\psi} [\%]$	$Z_{wzw} [\Omega]$	$\delta Z_{wzw} [\%]$
1.	30,016	-0,06	30,031	0
2.	30,014	-0,06	29,972	-0,2
3.	30,018	-0,05	30,065	0,106
4.	30,01	-0,08	30,029	-0,01
5.	30,014	-0,07	30,037	0,011
6.	30,01	-0,08	30,025	-0,02
7.	30,011	-0,08	30,07	-0,12
8.	30,013	-0,07	30,068	-0,12
9.	30,012	-0,07	30,026	-0,02
10.	30,013	-0,07	30,039	0,017

Część D – przykładowe wyniki wzorcowania MIP (z korekcją)

Tablica D.1. Wyniki wzorcowania MIP przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych: $E_z=230$, rolę impedancji wzorcowej Z_{wz} pełni rezystor normalny równy $R_N=10,0134\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
	$Z_{wz\psi m} [\Omega]$	$\delta Z_{wz\psi m} [\%]$	$Z_{wzwm} [\Omega]$	$\delta Z_{wzwm} [\%]$
1.	10,03	0,17	10,025	0,119
2.	10,027	0,14	10,026	0,121
3.	10,026	0,12	10,025	0,112
4.	10,025	0,12	10,026	0,127
5.	10,025	0,11	10,034	0,2
6.	10,027	0,14	10,022	0,09
7.	10,027	0,14	10,34	0,2
8.	10,026	0,12	10,023	0,097
9.	10,028	0,14	10,022	0,088
10.	10,026	0,12	10,022	0,089

Tablica D.2. Wyniki wzorcowania MIP przy sinusoidalnej krzywej napięcia i dla danych:
 $E_z=230$, $Z_w=10,17\Omega$, $R_0=38,3\Omega$

Lp.	$\phi_{wz} [^\circ]$	Metoda z przesunięciem ψ		Metoda wektorowa	
		$Z_{wz\psi m} [\Omega]$	$\delta Z_{wz\psi m} [\%]$	$Z_{wzwm} [\Omega]$	$\delta Z_{wzwm} [\%]$
1.	0	10,106	-0,63	10,113	-0,55
2.	10	10,059	-1,09	10,054	-1,13
3.	15	10,15	-0,2	10,169	-0,01
4.	20	10,07	-0,99	10,084	-0,84
5.	25	9,995	-1,72	10,019	-1,48
6.	30	10,082	-0,87	10,07	-0,97
7.	35	10,117	-0,52	10,081	-0,87
8.	40	10,127	-0,42	10,101	-0,68
9.	45	10,076	-0,92	10,126	-0,43
10.	50	10,136	-0,05	10,16	-0,09
11.	55	10,165	-0,33	10,184	-0,138
12.	60	10,163	-0,07	10,213	0,418
13.	65	10,241	0,7	10,248	0,764
14.	70	10,226	0,55	10,283	1,11
15.	75	10,258	0,87	10,319,	1,466

