

Sebastian BARWINEK, Adam CICHY, Artur SKÓRKOWSKI
 Politechnika Śląska
 Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki

ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI PRZESUWNIKÓW FAZOWYCH W UKŁADACH QUASI-ZRÓWNOWAŻONYCH

W poniższej pracy analizowano właściwości przesuwника fazowego stanowiącego istotny element wirtualnego układu pomiarowego, przeznaczonego do pomiaru współczynnika strat elektrycznych $\text{tg}\delta$. Układ wykorzystuje rozwiązanie niemostkowego układu quasi-zrównoważonego do pomiaru pojemności. Po odstrojeniu układu od stanu quasi-równowagi jest możliwy pomiar współczynnika $\text{tg}\delta$. Przedstawiono różne możliwości realizacji przesuwника fazowego $\pi/2$ w środowisku LabVIEW. Zaprezentowano wpływ parametrów sygnału na błąd przesunięcia fazowego. Jako algorytm pomiaru kąta fazowego wykorzystano algorytm krótkookresowej transformaty Fouriera. Porównano wyniki badań symulacyjnych oraz wyniki badań rzeczywistego układu pomiarowego wykorzystującego kartę pomiarową NI USB-6251 firmy National Instruments.

Słowa kluczowe: przyrządy wirtualne, przesuwnik fazowy, pomiar kąta przesunięcia fazowego, LabVIEW.

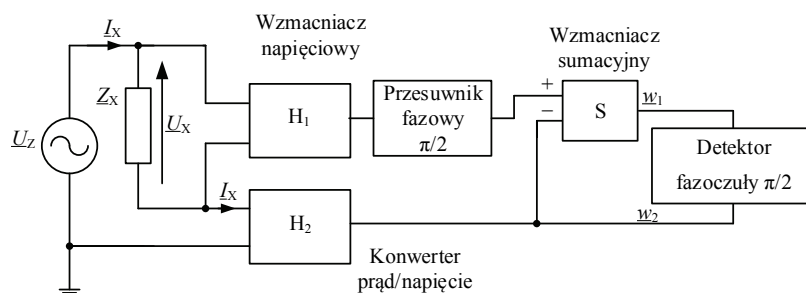
PROPERTY ANALYSIS OF PHASE SHIFTERS IN QUASI-BALANCED CIRCUITS

A virtual measurement system, designed to measure loss factor $\text{tan}\delta$, has been analyzed in this paper. The system uses a structure of the non-bridge, quasi-balanced circuit for capacity measuring. After detuning it from the quasi-equilibrium state, it is possible to measure $\text{tan}\delta$. Some implementations of the phase shifters in the LabVIEW environment have been presented. The influence of the signal parameters on the phase shift error was presented. The short-term Fourier transform algorithm has been used as the phase angle measurement algorithm. Results of simulation studies and results of the measuring real system using NI data acquisition board USB-6251 from National Instruments have been compared.

Keywords: virtual instruments, phase shifter, measurement of phase shift, LabVIEW

1. WPROWADZENIE

Metody quasi-zrównoważone z detekcją fazową służą do pomiaru składowych immitancji oraz współczynnika strat elektrycznych i dobroci cewek. W układach tych wyróżnia się pewien stan, w którym przesunięcie fazowe wybranych sygnałów układu jest ściśle określone. Jest to tak zwany stan quasi-równowagi [1]. W procesie pomiarowym sprowadza się układ do tego stanu, wykorzystując pojedynczy element nastawny.



Rys. 1. Schemat blokowy aktywnego quasi-zrównoważonego układu do pomiaru składowej biernej impedancji

Jedną z przykładowych realizacji układu quasi-zrównoważonego przedstawiono na rys. 1 [2], [3]. W układzie tym stan quasi-równowagi oznacza ortogonalność sygnałów wyróżnionych w_1 i w_2 . Jest to układ aktywny do pomiaru składowej biernej impedancji. Sygnały podlegające detekcji można zapisać jako:

$$\begin{cases} \underline{w}_1 = H_1 j \underline{U}_X - H_2 \underline{I}_X \\ \underline{w}_2 = H_2 \underline{I}_X \end{cases}, \quad (1)$$

gdzie: \underline{U}_X - napięcie mierzonej impedancji \underline{Z}_X , \underline{I}_X - prąd płynący przez impedancję \underline{Z}_X , H_1 - wzmacnienie wzmacniacza napięciowego, H_2 - współczynnik konwersji konwertera prąd/napięcie.

Elementem nastawnym może być w omawianym układzie wzmacniacz o regulowanym wzmacnieniu H_1 lub konwerter prąd/napięcie o regulowanym współczynniku konwersji H_2 . W układzie konieczne jest zastosowanie przesuwnika fazowego, którego dokładność ma bezpośredni wpływ na wyniki pomiarów. Przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami \underline{w}_1 i \underline{w}_2 jest mierzone za pomocą detektora fazoczułego i w stanie quasi-równowagi wynosi $\pi/2$. W stanie tym możliwe jest wyznaczenie składowej biernej badanej impedancji z zależności:

$$\text{Im}(\underline{Z}_X) = \frac{H_{20}}{H_{10}}, \quad (2)$$

gdzie: H_{10} - wzmacnienie wzmacniacza napięciowego w stanie quasi-równowagi, H_{20} - współczynnik konwersji konwertera prąd/napięcie w stanie quasi-równowagi.

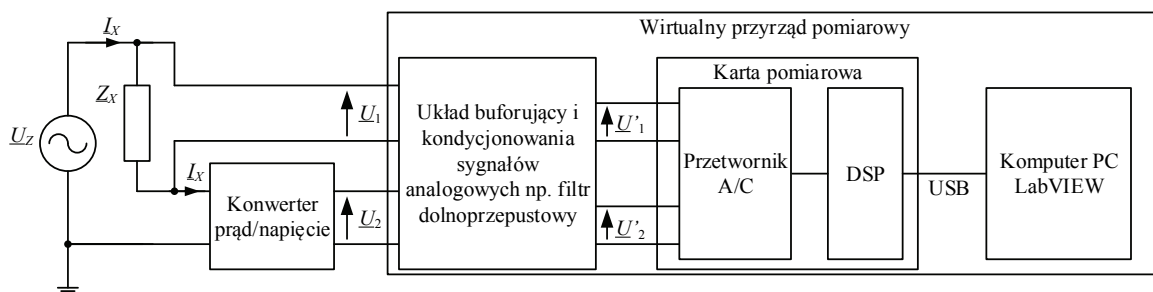
W celu wyznaczenia współczynnika stratności dielektrycznej, po wyznaczeniu stanu quasi-równowagi, wykonuje się odstrojenie układu poprzez zmianę nastawy np. wzmacnienia H_1 . Wówczas można wyznaczyć współczynnik strat elektrycznych z równania [4]:

$$\text{tg} \delta_X = \tan \Phi_{WA} \left(\frac{H_{10}}{H_1} - 1 \right). \quad (3)$$

gdzie: Φ_{WA} - wartość kąta przesunięcia fazowego osiągnięta w stanie quasi-równowagi układu.

2. UKŁAD POMIAROWY

Układ pomiarowy z rys. 1 został zrealizowany w postaci przyrządu wirtualnego przedstawionego na rys. 2. Przyrząd składa się z części sprzętowej oraz programowej. Część sprzętowa to karta pomiarowa NI-USB6251 firmy National Instruments oraz komputer PC.



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego

Część programowa została zrealizowana w graficznym środowisku programistycznym LabVIEW. Kod programu, zgodnie z rys. 3, można podzielić na następujące części:

- blok akwizycji danych,

- blok przetwarzania danych,
- algorytm pomiaru kąta przesunięcia fazowego,
- blok wizualizacji oraz archiwizacji wyników.

Jako detektor stanu quasi-równowagi wykorzystano algorytm krótkookresowej transformaty Fouriera zapisany w funkcji MATLAB scripts. Algorytm ten charakteryzuje się dużą dokładnością oraz odpornością na zakłócenia [4].

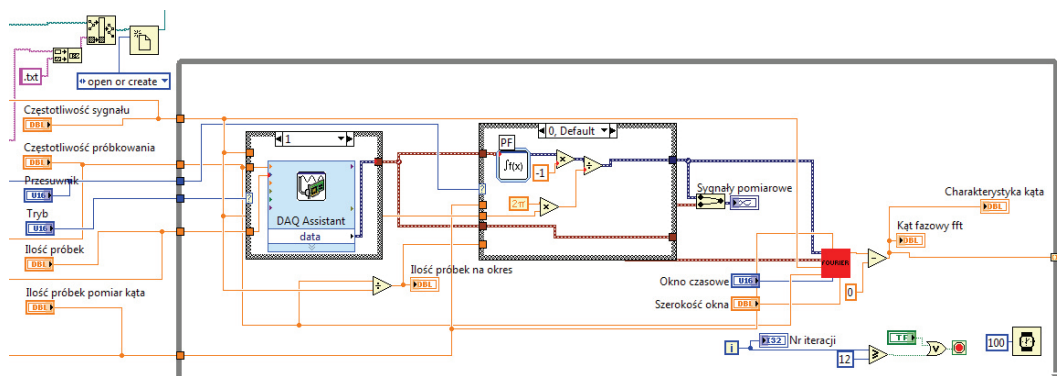
Podczas badań przetestowano dwie realizacje przesuwника fazowego:

- realizującego wyznaczenie pochodnej sygnału pomiarowego (funkcja Time Domain Math),
- opóźniającego sygnał poprzez przesunięcie o zadaną ilość próbek (zmianę indeksu) w tablicy.

W przypadku przesuwника działającego na zasadzie zmiany indeksu danych w tablicy, konieczne jest zapewnienie warunku:

$$\frac{f_s}{4f_c} = N, \quad (4)$$

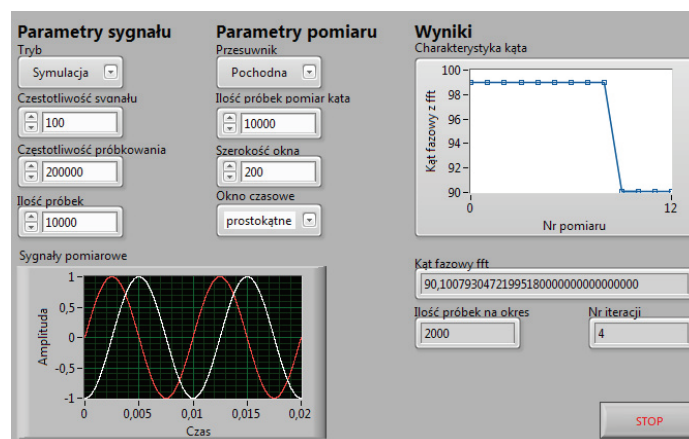
gdzie: f_s - częstotliwość próbkowania sygnału, f_c - częstotliwość badanego sygnału, N - dowolna liczba naturalna większa od zera.



Rys. 3. Fragment kodu programu

Przyrząd można skonfigurować do pracy w jednym z dwóch trybów:

- symulacji (badany sygnał jest symulowany za pomocą funkcji Sine Waveform),
- pomiaru (sygnał z zewnętrznego generatora).



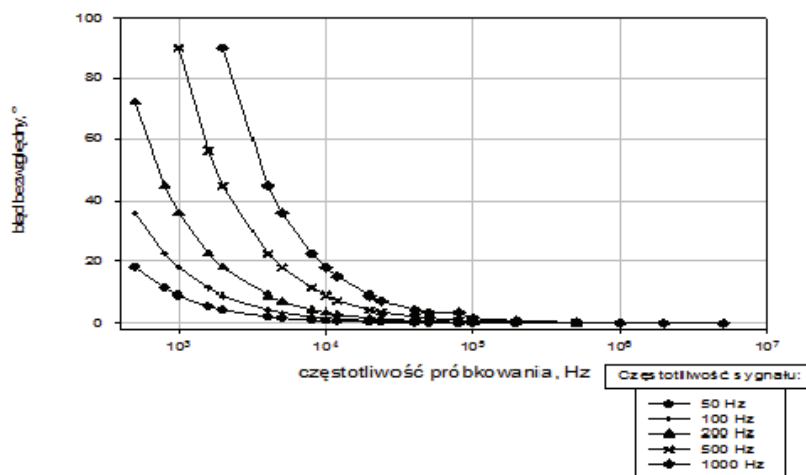
Rys. 4. Panel przyrządu wirtualnego

Możliwa jest także zmiana parametrów sygnału oraz algorytmu pomiaru kąta przesunięcia fazowego. Wyniki pomiaru są prezentowane na panelu przyrządu w postaci danych liczbowych oraz charakterystyk (rys. 4).

3. WYNIKI POMIARÓW

Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie jakości rozwiązań przesuwników fazowych stosowanych w wirtualnych realizacjach układów quasi-zrównoważonych, w szczególności przeznaczonych do wykorzystania w odstrajanych układach do pomiaru współczynnika strat elektrycznych $\tan\delta$. Do badań użyto sygnałów sinusoidalnych o amplitudzie 1 V oraz częstotliwościach: 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1000 Hz. Pobierano 10000 próbek sygnału pomiarowego, natomiast w algorytmie pomiaru kąta fazowego wykorzystano okno prostokątne o szerokości połówkowej 200 próbek. Wynik pomiaru kąta fazowego jest wartością uśrednioną z 9600 pomiarów, natomiast ostateczny wynik jest uzyskany z 12 pomiarów.

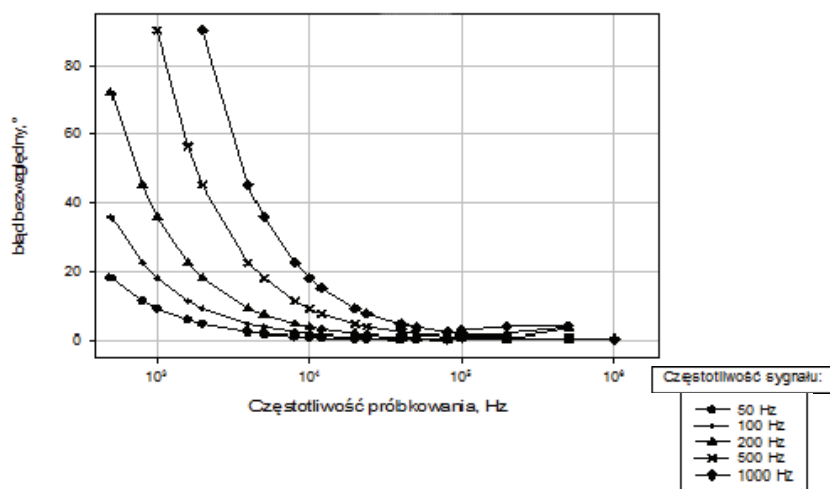
Jedną z metod realizacji przesunięcia fazowego sygnałów sinusoidalnych jest wyznaczenie pochodnej sygnału względem czasu. Taki sposób umożliwia stosunkowo łatwą algorytmizację przesuwnika fazowego $\pi/2$, jednak jest zwykle mało odporny na zakłócenia. Wykorzystuje się różne metody różniczkowania numerycznego, może to być np. metoda różnicowa lub bardziej zaawansowany algorytm Richardsona. W pakiecie LabVIEW zaimplementowana jest funkcja wyznaczania pochodnej sygnału, jednak producent nie informuje o rodzaju algorytmu wykorzystanego do wyznaczenia pochodnej. Funkcja ta została poddana badaniu symulacyjnemu. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 5.



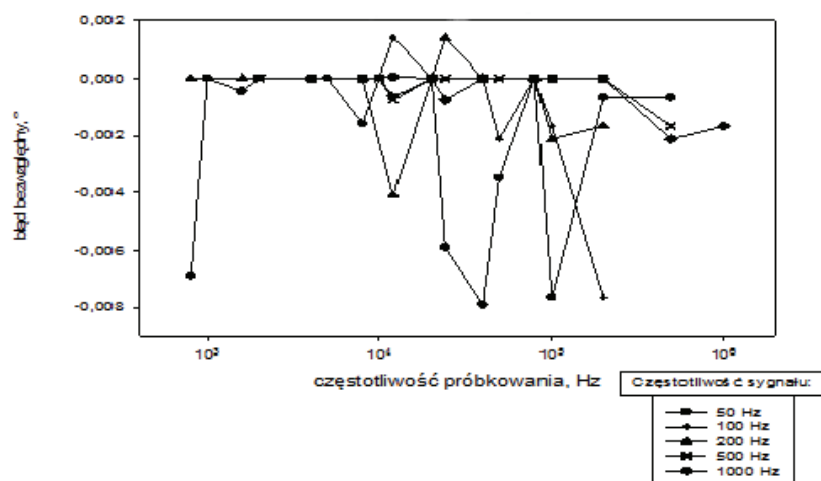
Rys. 5. Wyniki symulacji z zastosowaniem przesuwnika fazowego opartego na pochodnej sygnału

Następnie wykorzystując kartę pomiarową zbadano zachowanie się przesuwnika, na którego wejście podano rzeczywiste sygnały pomiarowe, pochodzące z generatora Rigol DG1011. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 6.

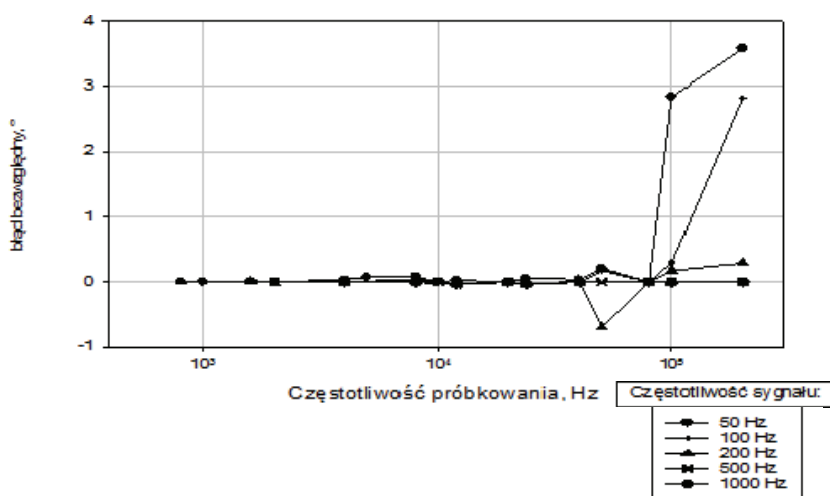
Inną metodą przesuwania sygnału o kąt fazowy może być jego odpowiednie opóźnienie czasowe. W przypadku kąta fazowego $\pi/2$ należy opóźnić sygnał o czas równy $1/4$ okresu przebiegu. W cyfrowych układach pomiarowych opóźnienie realizuje się poprzez zmianę indeksu stabilizowanych próbek sygnału pomiarowego. Przesuwnik fazowy realizujący opóźnienie w taki sposób poddano badaniom symulacyjnym i badaniom z wykorzystaniem rzeczywistego sygnału pomiarowego w podobny sposób, jak wcześniejszy przesuwnik. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 7 i 8.



Rys. 6. Wyniki pomiaru z zastosowaniem przesuwника fazowego opartego na pochodnej sygnału



Rys. 7. Wyniki symulacji z zastosowaniem przesunięcia o zadaną ilość próbek



Rys. 8. Wyniki pomiaru z zastosowaniem przesunięcia o zadaną ilość próbek

Uzyskane wyniki można ocenić porównując błędy przesunięcia fazowego. Minimalny błąd bezwzględny wyznaczony dla układu z pochodną wyniósł w badaniach symulacyjnych 0,03° (dla

sygnału o częstotliwości 50 Hz i częstotliwości próbkowania 500 kHz), natomiast w pomiarach dla realnych sygnałów uzyskano błąd na poziomie $0,1^\circ$ (sygnał o częstotliwości 50 Hz i częstotliwości próbkowania 80 kHz). Z kolei minimalny błąd bezwzględny wyznaczony dla układu z opóźnieniem sygnału wyniósł w badaniach symulacyjnych w kilku przypadkach poniżej 10^{-13}° , natomiast w przypadku rzeczywistego sygnału wejściowego uzyskano $0,001^\circ$ (dla wielu kombinacji parametrów, między innymi: sygnału o częstotliwości 50 Hz oraz częstotliwości próbkowania 1 kHz).

Maksymalny błąd bezwzględny wyznaczony dla układu z pochodną wyniósł w badaniach symulacyjnych i w pomiarach z wykorzystaniem rzeczywistego sygnału 90° (dla częstotliwości próbkowania dwukrotnie większej od częstotliwości sygnału) oraz 45° (dla częstotliwości próbkowania czterokrotnie większej od częstotliwości sygnału). Maksymalny błąd bezwzględny wyznaczony dla układu z opóźnieniem sygnału wyniósł w badaniach symulacyjnych $-0,008^\circ$ (błąd taki uzyskano w kilku pomiarach, m.in. dla sygnału o częstotliwości 50 Hz oraz częstotliwości próbkowania 40 kHz), natomiast w przypadku rzeczywistego sygnału wejściowego uzyskano $3,6^\circ$ (dla sygnału o częstotliwości 50 Hz oraz częstotliwości próbkowania 200 kHz).

4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie odpowiedniego przesuwника fazowego wpływa bezpośrednio na dokładność uzyskania stanu quasi-równowagi oraz pomiar składowych impedancji, współczynnika strat dielektrycznych oraz dobroci cewek.

W pracy przedstawiono dwie możliwości realizacji przesuwника, które znacząco różnią się od siebie. Przesuwnik fazowy $\pi/2$ wykorzystujący pochodną sygnału charakteryzuje się większymi błędami od przesuwника wykorzystującego przesunięcie o pewną ilość próbek. Błąd przesunięcia maleje wraz ze wzrostem częstotliwości próbkowania - dwukrotne zwiększenie częstotliwości próbkowania powoduje w przybliżeniu dwukrotne zmniejszenie błędu. W przypadku dużych częstotliwości próbkowania występuje zniekształcenie sygnału pomiarowego przez przesuwnik.

Metoda wykorzystująca tablicę próbek umożliwia uzyskanie błędów na poziomie $0,001^\circ$ (w przypadku symulacji błędy wynikają z zaokrągleń obliczeniowych i są, w najlepszych przypadkach, rzędu 10^{-13}°) już przy częstotliwości próbkowania wynoszącej 1 kHz. W przypadku pomiarów z wykorzystaniem pochodnej sygnału uzyskano minimalne błędy o dwa rzędy większe. Mniejsza częstotliwość próbkowania przekłada się na mniejsze wymagania sprzętowe oraz obliczeniowe. Wadą tej metody jest konieczność zapewnienia odpowiedniej proporcji pomiędzy częstotliwością próbkowania a częstotliwością sygnału.

LITERATURA

1. Cichy A.: Analiza właściwości układów quasi-zrównoważonych z detekcją fazową przeznaczonych do pomiaru składowych immitancji. Monografia 479. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
2. Cichy A., Skórkowski A., Barwinek S.: Automated quasi-balancing in virtual quasi-balanced circuit designed to capacitance measurements. 19th Symposium IMEKO TC-4 Symposium and 17th TC-4 IWADC. Workshop Advances in Instrumentation and Sensors Interoperability, Barcelona. Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain 2013.
3. Cichy A., Skórkowski A., Barwinek S.: Double quasi-balanced meter for measurement of inductor quality factor. 19th Symposium IMEKO TC-4 Symposium and 17th TC-4 IWADC. Workshop Advances in Instrumentation and Sensors Interoperability, Barcelona. Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain 2013.
4. Gajda J., Sroka R.: Pomiary kąta fazowego: metody, układy, algorytmy. Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, Kraków 2000.