

Ryszard RYBSKI

UNIwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej

Wzorcowanie układów odtwarzających zespolony stosunek napięć sinusoidalnych generowanych cyfrowo

Dr inż. Ryszard RYBSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej w roku 1989. Obecnie jest pracownikiem Instytutu Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego. Główny obszar badawczy obejmuje zagadnienia związane z dokładnymi pomiarami wielkości elektrycznych, w szczególności z pomiarami impedancji.



e-mail: r.rybski@ime.uz.zgora.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono metody wzorcowania układów odtwarzających zespolony stosunek napięć sinusoidalnych generowanych z zastosowaniem metod cyfrowych. Zaproponowano i scharakteryzowano układy pomiarowe umożliwiające praktyczną realizację wymienionych metod wzorcowania.

Słowa kluczowe: cyfrowa generacja napięć sinusoidalnych, zespolony stosunek napięć, wzorcowanie.

Calibration of circuits reproducing the complex sinusoidal voltage ratio generated using digital methods

Abstract

The paper presents the methods of calibration of circuits reproducing the complex voltage ratio generated using digital methods. Measurement circuits which enable a practical execution of the above calibration methods were proposed and described.

Keywords: digital sinewave generation, complex voltage ratio, calibration.

1. Wstęp

Dokładność odtworzenia stosunku dwu napięć sinusoidalnych, z uwzględnieniem relacji odpowiednio między ich amplitudami i fazami początkowymi (zespolonego stosunku napięć), decyduje o właściwościach metrologicznych wielu układów i przyrządów pomiarowych. Zespolony stosunek napięć odtwarzany przez stosowane w tym celu najczęściej takie narzędzia pomiarowe jak impedancyjne dzielniki napięcia, indukcyjne dzielniki napięcia, transformatory pomiarowe czy wzmacniacze pomiarowe charakteryzuje się wartością nominalną argumentu (różnicą wartości nominalnych faz początkowych) 0 lub $\pm\pi$.

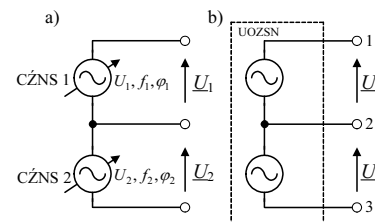
Cyfrowe metody generacji napięć sinusoidalnych pozwalają budować dwu- lub wielofazowe źródła napięć, w których stosunkowo łatwo można zapewnić stabilny, niezależny od nastawianej częstotliwości i regulowany z dużą rozdzielczością kąt przesunięcia fazowego, przy jednoczesnym zachowaniu dobrych parametrów charakteryzujących amplitudy generowanych napięć. Wykorzystując cyfrowe źródła napięć sinusoidalnych (CZNS) można odtwarzać stosunek dwu napięć sinusoidalnych, którego wartość nominalna argumentu może zmieniać się od 0 do $\pm\pi$. Możliwości te są wykorzystywane w praktyce, np. w kalibratorach mocy czy w komparatorach impedancji [1, 2].

Określenie dokładności układu dwóch CZNS odtwarzających zespolony stosunek napięć (UOZSN) ma decydujące znaczenie dla oceny możliwości ich praktycznego wykorzystania. Niepewność odtwarzania zespolonego stosunku napięć można ocenić stosując w tym celu modele matematyczne CZNS [2]. Taka tendencja, znajdująca potwierdzenie m.in. w zaawansowanych aktualnie pracach nad liczalnymi kwantowymi CZNS [3], odgrywa

bardzo ważną rolę w przemiennoprądowych pomiarach o najwyższej dokładności. Jednak ocena niepewności odtwarzania zespolonego stosunku napięć, szczególnie w pomiarach o dużej dokładności, wymaga zawsze weryfikacji eksperymentalnej z zastosowaniem metod i układów o odpowiednio mniejszej niepewności. Z tego powodu duże znaczenie praktyczne mają metody i układy pomiarowe umożliwiające wzorcowanie układów odtwarzających zespolony stosunek napięć sinusoidalnych generowanych metodami cyfrowymi. W pracy przedstawia się metody pomiaru błędów odtwarzania zespolonego stosunku napięć przez CZNS i wybrane przykłady ich realizacji układowej.

2. Odtwarzanie zespolonego stosunku napięć przez cyfrowe źródła napięć sinusoidalnych

Dwa szeregowo połączone cyfrowe źródła napięcia sinusoidalnego CZNS 1, CZNS 2 (rys. 1a) dostarczają napięcia \underline{U}_1 , \underline{U}_2 o regulowanej amplitudzie, fazie początkowej i częstotliwości. Zakłada się, że obydwie źródła pracują synchronicznie z częstotliwością $f_1 = f_2 = f$. Ponadto zakłada w niniejszej pracy, w celu uproszczenia analizy, że impedancja wyjściowa źródeł jest pomijalnie mała.



Rys. 1. Dwa cyfrowe źródła napięcia sinusoidalnego odtwarzające zespolony stosunek napięć $\underline{U}_1/\underline{U}_2$: a) schemat szeregowo połączonych dwóch CZNS, b) przyjęty schemat układu odtwarzającego zespolony stosunek napięć (UOZSN)

Fig. 1. Two digital sources of the sinusoidal voltage reproducing the complex voltage ratio $\underline{U}_1/\underline{U}_2$: a) diagram of serially connected two digital sources of the sinusoidal voltage b) established diagram of circuits for the reproduction of the complex voltage ratio

Zespolony stosunek napięć \underline{K}_U jest równy ilorazowi ich amplitud zespolonych \underline{U}_1 i \underline{U}_2 i może być przedstawiony zależnością:

$$\underline{K}_U = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{U_1 e^{j\varphi_1}}{U_2 e^{j\varphi_2}} = \frac{U_1}{U_2} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} = K_U e^{j\varphi_U}, \quad (1)$$

w której U_1 , U_2 reprezentują amplitudy, φ_1 , φ_2 – fazy początkowe odpowiednio napięć \underline{U}_1 i \underline{U}_2 , natomiast K_U , φ_U – odpowiednio moduł i argument zespolonego stosunku napięć.

Układ CZNS odtwarzający zespolony stosunek napięć \underline{K}_U może być traktowany jako aktywny wzorec stosunku dwu napięć, przy czym fazy początkowe obu wartości definiujących zespolony stosunek napięć mogą przyjmować dowolne wartości z przedziału $(-\pi, +\pi)$. W związku z tym nominalna wartość \underline{K}_n zespolonego stosunku napięć \underline{K}_U jest liczbą zespoloną. Nawijając do definicji wzorca stosunku dwu wartości [4] można przyjąć, że układ dwu połączonych szeregowo CZNS jest narzędziem pomiarowym odtwarzającym stosunek dwu napięć przemiennych, przy czym wartość nominalna \underline{K}_n tego stosunku jest wyrażona liczbą zespoloną. Zależność pomiędzy wartością rzeczywistą i nominalną zespolonego stosunku napięć ma postać:

$$\underline{K}_U = \underline{K}_n (1 + \delta_K), \quad (2)$$

gdzie: δ_K jest względnym błędem zespolonego stosunku napięć reprezentowanym przez część rzeczywistą $\text{Re}[\delta_K]$ i urojona $\text{Im}[\delta_K]$. Przyjmując, że wartość δ_K jest względnie mała, można zależność (2) zapisać w postaci [2]:

$$\underline{K}_U = \underline{K}_n (1 + \alpha + j\beta), \quad (3)$$

w której $\alpha \approx \text{Re}[\delta_K]$ jest względnym błędem modułu K_U , a $\beta \approx \text{Im}[\delta_K]$ - błędem argumentu φ_U .

3. Wzorcowanie układów odtwarzających zespolony stosunek napięć

Układ dwóch CZNS odtwarzających zespolony stosunek napięć można traktować jako wzorzec wielostosunkowy, którego liczba możliwych nastaw wartości nominalnej zespolonego stosunku napięć \underline{K}_n wynika z rozdzielczości nastawy jego modułu K_n i argumentu φ_n . W przypadku wzorców wielostosunkowych, ze względu dużą liczbę możliwych nastaw nie ma uzasadnienia, ani technicznych możliwości wzorcowania wszystkich nastaw wzorca. W związku z tym konieczny jest arbitralny wybór punktów wzorcowania. Wybór ten podyktowany jest najczęściej wymaganiami układu pomiarowego, w którym UOZSN jest stosowany. Wybierając punkty wzorcowania UOZSN stosowanych np. w komparatorach impedancji, należy brać pod uwagę wartości wynikające ze stosunku modułów porównywanych impedancji i różnicy ich argumentów. W przypadku komparacji wzorców R, L, C szczególne znaczenie mają następujące wartości nominalne argumentu zespolonego stosunku napięć: $0, \pm\pi/2$ i π . Zakres zmian modułu K_n w dokładnych pomiarach impedancji mieści się w przedziale $0,1 \div 1$, przy czym ważne znaczenie ma przypadek porównywania impedancji o zbliżonych do siebie wartościach modułu, co odpowiada przypadkowi $K_n = 1$. Ustalając punkty wzorcowania UOZSN należy również uwzględnić techniczne możliwości przeprowadzenia tej procedury.

Metody i układy pomiarowe stosowane do wzorcowania wielostosunkowych wzorców napięć przemiennych, których nominalne wartości kątów fazowych są równe lub różnią się o wartość π , są znane z wielu prac, np. [4, 5]. Dzieli się one na metody pośrednie i metody bezpośredniego porównania z wzorcem i różnią się istotnie założeniami dotyczącymi sprawdzanych narzędzi oraz układów pomiarowych stosowanych do ich realizacji.

W pomiarach o najwyższej dokładności stosowane są metody pośrednie ze względu na brak wzorców odniesienia o odpowiedniej dokładności. Cechą charakterystyczną metod pośrednich jest konieczność wykonania szeregu pomiarów, przy różnych konfiguracjach połączeń układu pomiarowego, co znacznie wydłuża w czasie procedurę wzorcowania. Oznacza to w praktyce konieczność spełnienia przez sprawdzane narzędzie wysokich wymagań dotyczących stabilności czasowej odtwarzanego stosunku napięć.

Metody bezpośredniego porównania polegają na komparacji stosunków napięć odtwarzanych przez dwa wzorce: odniesienia o wyższym rzędzie dokładności i znanej wartości poprawnej odtwarzanego stosunku napięć $\underline{K}_{U,N}$ i sprawdzanego, o niższym rzędzie dokładności, odtwarzającego stosunek napięć $\underline{K}_{U,X}$. Metody te są prostsze od metod pośrednich, a ich realizacja może zachodzić w krótkim czasie.

Biorąc pod uwagę podane wyżej uwagi oraz ogólne właściwości metod sprawdzania wzorców stosunku dwu napięć można sformułować następujące wnioski dotyczące wzorcowania układów z CZNS odtwarzającymi zespolony stosunek napięć:

- ze względu na mniejszą stabilność czasową układów z CZNS odtwarzającymi stosunek napięć w porównaniu z wzorcami stosunku wykorzystującymi elementy o silnym sprzężeniu magnetycznym, metody pośrednie mogą być stosowane do wzorcowania w ograniczonym zakresie, sprowadzającym się np. do metody przestawienia,

- uwzględniając aktualny poziom dokładności odtwarzania zespolonego stosunku napięć przez CZNS (niepewność rzędu $1 \cdot 10^{-6}$ w odniesieniu do modułu i argumentu) należy przyjąć, że istnieją wzorce, które umożliwiają stosowanie metody bezpośredniego porównania,
- nie ma możliwości stosowania metody bezpośredniego porównania w przypadku, jeśli wartość nominalna odtwarzanego stosunku napięć jest różna od 0 i π ze względu na brak odpowiednich wzorców odniesienia.

Rozpatrywane poniżej zagadnienie wzorcowania UOZSN ograniczono do metody przestawienia (rys. 2a) i metody bezpośredniego porównania (rys. 2b).

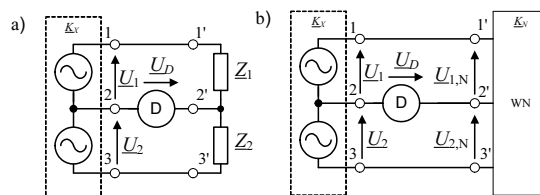


Fig. 2. Calibration circuit of digital sources of the sinusoidal voltage reproducing the complex voltage ratio: a) transposition method, b) method of direct comparison with the standard

W układzie przedstawionym na rys. 2a wyznaczenie różnic sprowadza się do dwukrotnego pomiaru napięcia pomiędzy końcówkami 2 i 2'. Podczas realizacji procedury wzorcowania musi być spełniony szereg założeń, z których najistotniejsze dotyczą niezmienności w czasie błędu sprawdzanego narzędzia oraz staćności i bardzo dobrej stabilności temperaturowej elementów tworzących dzielnik impedancyjny. Ponadto osiągnięcie dużej dokładności wzorcowania wymaga, ażeby wyznaczane różnice napięć były względnie bardzo małe. Z tego powodu stosowanie metody przestawienia ogranicza się do wzorcowania układów spełniających warunki: $\underline{K}_{X,n} = 1$ lub $\underline{K}_{X,n} = \pm j$. Różnice napięć mogą być wyznaczane przez bezpośredni pomiar napięcia \underline{U}_D za pomocą nanowoltomierza fazoczułego lub metodą kompensacyjną.

Relację pomiędzy porównywanymi stosunkami napięć \underline{K}_X i \underline{K}_N przedstawia zależność:

$$\underline{K}_X^2 = 1 + \left[(\underline{U}_{D1,r} - \underline{U}_{D2,r}) + \frac{1}{\underline{K}_{N,n}} (\underline{U}_{D1,r} - \underline{U}_{D2,r}) \right], \quad (4)$$

w której $\underline{U}_{D1,r}$, $\underline{U}_{D2,r}$ oznaczają względne (odniesione do \underline{U}_2) różnice napięć wyznaczone przed- i po przestawieniu impedancji \underline{Z}_1 i \underline{Z}_2 .

Uwzględniając w (4), że $\underline{K}_X = K_{X,n} (1 + \alpha + j\beta)$, otrzymuje się zależność pozwalającą obliczyć błędy α i β :

$$K_{X,n}^2 (1 + 2\alpha + j2\beta) = 1 + \left[(\underline{U}_{D1,r} - \underline{U}_{D2,r}) + \frac{1}{\underline{K}_{N,n}} (\underline{U}_{D1,r} - \underline{U}_{D2,r}) \right]. \quad (5)$$

Wyznaczając zależność (6.11) pominięto składniki, w których występują iloczyny błędów α i β .

Wzorcowanie metodą bezpośredniego porównania z wzorcem (rys. 2b) polega na zmierzeniu napięcia \underline{U}_D wynikającego z różnicy pomiędzy stosunkiem napięć \underline{K}_X odtwarzanym przez sprawdzany układ i stosunkiem napięć odtwarzanym przez wzorzec odniesienia WN, którego wartość poprawna jest znana i określona przez zależność:

$$\underline{K}_N = K_{N,n} (1 + \alpha_N + j\beta_N), \quad (6)$$

przy czym zakłada się, że nominalne wartości argumentów porównywanych zespolonych stosunków napięć są jednakowe i przyjmują wartość 0 lub π , natomiast wartości nominalne modu-

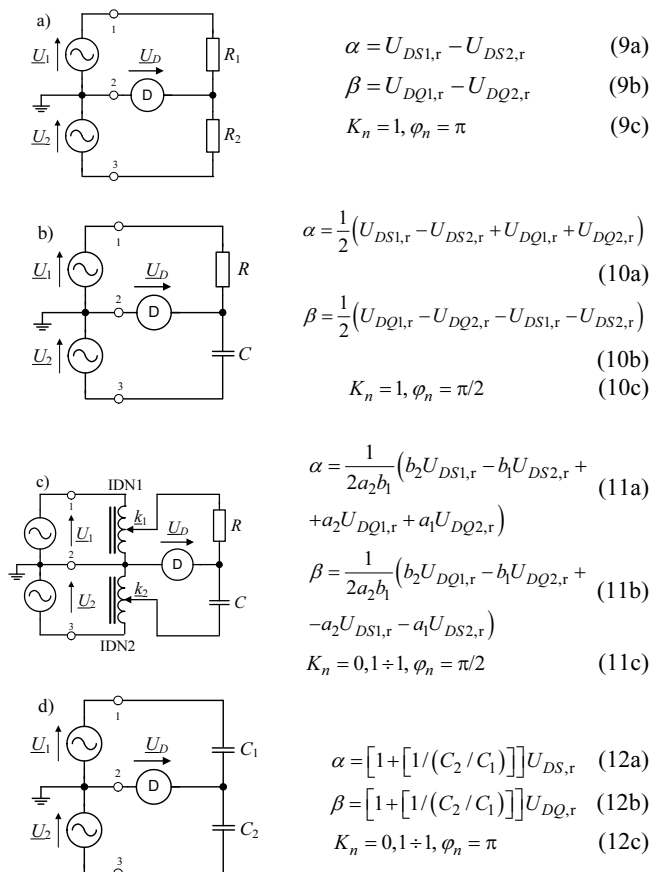
łów są sobie równe, tzn. $K_{X,n} = K_{N,n}$. Przy przyjętych założeniach, błędy α i β wyznacza się z zależności:

$$\alpha = \alpha_N + \left(1 + \frac{1}{K_{N,n}}\right) U_{DS,r}, \quad (7)$$

$$\beta = \beta_N + \left(1 + \frac{1}{K_{N,n}}\right) U_{DQ,r}, \quad (8)$$

w których $U_{DS,r}$ i $U_{DQ,r}$ oznaczają odpowiednio składową synfazową i kwadraturową względnego napięcia \underline{U}_D . Napięcie to, podobnie jak w przypadku metody pośredniej, mierzy się za pomocą fazoczułego nanowoltomierza lub metodą kompensacyjną.

Na rys. 3 przedstawiono wybrane przykłady niektórych z opracowanych przez autora, lub przy jego współdziałaniu, układów pomiarowych przeznaczonych do wzorcowania UOZSN, zależności umożliwiające obliczenie błędów modułu i argumentu oraz wartości nominalne modułu i argumentu wzorowanego układu.



Rys. 3. Układy pomiarowe przeznaczone do wzorcowania układów odtwarzających zespolony stosunek napięć: metodą pośrednią (a, b, c), metodą bezpośredniego porównania (d)

Fig. 3. Measurement circuits designed for calibration of the reproduction of the complex voltage ratio using: indirect method (a, b, c), method of direct comparison with the standard (d)

We wszystkich układach przedstawionych na rys. 3 wzorcowane układy porównywane są z dzielnikami impedancyjnymi. W układach przedstawionych na rys. 3b i c po przestawieniu elementów R, C dzielnika impedancyjnego, konieczna jest zmiana fazy początkowej jednego ze źródeł napięcia o kąt π . Nie jest możliwa zazwyczaj zamiana końcówek wyjściowych źródła napięcia, ponieważ ich wyjścia są niesymetryczne. Z tego powodu należy zmienić programowo fazę początkową jednego z napięć (tzw. „programowe przestawienie źródła”).

Zależności (11a), (11b), odnoszące się do układu z rys. 3c, wyznaczono przyjmując, że błędy przekładni napięciowej indukcyj-

nych dzielników napięcia IDN1, IDN2 mają pomijalnie małe wartości. W układzie z rys. 3d dzielnik wzorcowy może być również zestawiony z rezystorów. Dzięki zastosowaniu kondensatorów wzorcowych o bardzo małej wartości współczynnika strat dielektrycznych ($D_1 \leq 1 \cdot 10^{-4}$, $D_2 \leq 1 \cdot 10^{-4}$), np. kondensatorów z dielektrykiem powietrznym, minimalizuje się wpływ parametrów resztkowych elementów tworzących dzielnik napięcia na wartość napięcia różnicowego \underline{U}_D , upraszczając tym samym warunki wyznaczania błędów α i β .

Dokładność wzorcowania z zastosowaniem układów podanych na rys. 3 zależy od stopnia spełnienia założeń realizowanych metod wzorcowania, dokładności pomiaru napięć różnicowych, dokładności wyznaczenia wartości poprawnej zespolonego stosunku napięć odtwarzanego przez wzorzec odniesienia – w metodzie bezpośredniego porównania. Analizę niepewności wzorcowania narzędzi pomiarowych odtwarzających stosunek dwu napięć przemiennych realizowanego metodami pośrednimi i metodami bezpośredniego porównania prezentowano w wielu pracach (np. [4, 5]). Ocena niepewności wyznaczenia błędów układów odtwarzających i mierzących zespolony stosunek napięć wymaga zawsze szczegółowego przeanalizowania źródeł niepewności, oddzielnie dla każdego z przedstawionych rozwiązań i powinna uwzględniać również ewentualne dodatkowe źródła niepewności wynikające z ich realizacji układowej.

Właściwości metrologiczne przedstawionych układów pomiarowych zostały zweryfikowane doświadczalnie z wykorzystaniem specjalnie w tym celu opracowanego systemu pomiarowego [6, 7]. Niepewności wzorcowania osiągnęte w zrealizowanym systemie pomiarowym mieściły się w przedziale $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-6}$, w zależności od jego konfiguracji.

4. Podsumowanie

Cyfrowe źródła napięć sinusoidalnych umożliwiają budowę układów odtwarzających z dużą dokładnością zespolony stosunek napięć, którego argument może przyjmować wartości nominalne z przedziału $\pm\pi$. Zastosowanie tego rodzaju aktywnych wielostosunkowych wzorców stosunku napięć w układach pomiarowych wymaga wcześniejszego wyznaczenia ich dokładności na drodze doświadczalnej. W pracy przedstawiono metody wzorcowania układów odtwarzających zespolony stosunek napięć tworzonych przez cyfrowe źródła napięć sinusoidalnych. Zaproponowano również wybrane przykłady realizacji układowej wymienionych metod, podano zakres ich stosowalności oraz zależności niezbędne do przeprowadzenia procedury wzorcowania.

5. Literatura

- [1] R. Rybski, J. Kaczmarek: Measurement and reproduction of a complex voltage ratio with the application of digital signal processing algorithms. Measurements models systems and design / ed. by J. Korbicz. WKŁ, Warszawa 2007, s. 1-27.
- [2] R. Rybski: Komparacja impedancji w układach z cyfrowymi źródłami napięć sinusoidalnych. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2007.
- [3] R. Behr, L. Palafox, G. Ramm, H. Moser, J. Melcher J.: Direct comparison of Josephson waveforms using an AC quantum voltmeter. IEEE Trans. on Instr. and Meas., vol. 56, No. 2, 2007.
- [4] T. Skubis: Metody wzorcowania elektrycznych narzędzi pomiarowych odtwarzających stosunek dwu wartości. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, nr 143, Gliwice 1995.
- [5] J. Jaskulski: Indukcyjne dzielniki napięcia. Prace Naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej nr 24, seria Monografie 5, Wrocław 1984.
- [6] R. Rybski, J. Kaczmarek: Calibration of a system for the measurement of complex voltage ratios. Proc. XVI IMEKO World Congress, IMEKO 2000, Vienna 2000.
- [7] R. Rybski, J. Kaczmarek: Kalibracja próbkującego systemu do pomiaru zespolonego stosunku napięć. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 7/8, 2002.