

Leszek FURMANKIEWICZ

UNIwersytet Zielonogórski,
Podgórną 50, 65-246 Zielona Góra

Wzmacniacz pomiarowy o podwyższonych parametrach metrologicznych do zastosowań w paśmie akustycznym

Dr inż. Leszek FURMANKIEWICZ

Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze w 1988 r. Stopień naukowy doktora otrzymał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Zielonogórskiej w 1998 r. Obecnie pracuje na stanowisku starszego wykładowcy w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego. Od 2002 r. pełni funkcję zastępcy Dyrektora Instytutu. Główne zainteresowania zawodowe to systemy pomiarowe oraz pomiary wielkości elektrycznych, a w szczególności pomiary parametrów sieci energetycznej.

e-mail: l.furmankiewicz@ime.uz.zgora.pl



Streszczenie

W artykule przedstawiono strukturę rozbudowanego, dwukanałowego wzmacniacza pomiarowego (bufora) o podwyższonych parametrach metrologicznych w paśmie częstotliwości akustycznych. Wzmacniacz jest elementem systemu pomiarowego, w którym pełni rolę stopnia dopasowującego napięcia wpływające do niesymetrycznego wejścia układu pomiarowego. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wybranych stopni wzmacniacza.

Słowa kluczowe: precyzyjny wzmacniacz pomiarowy.

Instrumentation amplifier for use in the audio frequency range

Abstract

The paper presents an extended structure of two-channel instrumentation amplifier (IA). The IA has higher metrological parameters relating to typical-setup of an instrumentation amplifier (Fig. 2) in the audio frequency range. The IA is intended for use in a measurement system to calibrate low-value alternating-current standard resistors at audio frequencies. In the developed system a resistor R_X is directly compared with a standard resistor R_N (Fig. 1). The impedance ratio Z_X/Z_N of the resistors is determined from the measurement of the voltage ratio U_X/U_N . The measurement of floating voltages by a digitizer with grounded inputs requires IA (buffers) (B1, B2). Due to the assumptions concerning the system being developed, buffers should be characterized by a relatively high input impedance and small errors of the transformer voltage ratio over a frequency bandwidth from 40 Hz to 10 kHz. Block diagram of the IA is shown in Fig 3. The IA consist: two input buffers (BW1, BW2), input stage (SW) with floating ground (PM), difference amplifier (SR) and circuit for common mode voltage adjustment (KWNW). Figs. 4, 5, 6, 7 show a simplified schematic diagrams of the individual IA stages. In Figs. 8 and 9 the frequency characteristics of the module and phase error of the input buffer (BW1) voltage ratio are shown. The frequency characteristics of the input buffer BW2 are almost the same. In Fig. 10 the frequency characteristics of CMRR prior to adjustment and following the adjustment the real part of the CMR are shown.

Keywords: precision instrumentation amplifier.

1. Wprowadzenie

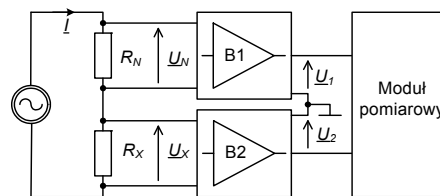
Wzmacniacze pomiarowe stosowane są do przetwarzania sygnałów różnicowych (nieziemionych) występujących na tle dużej składowej stałej. Klasyczna konfiguracja wzmacniacza pomiarowego zawiera wzmacniacz różnicowy i stopień wejściowy zrealizowany na bazie dwóch wzmacniaczy operacyjnych w konfiguracji nieodwracającej [1]. Tego typu wzmacniacze pomiarowe oferowane są obecnie przez producentów elementów elektronicznych w postaci scalonej i spełniają wymagania większości ich aplikacji. W układach pomiarowych przeznaczonych do pomiarów o dużej dokładności stosowane są wzmacniacze pomiarowe zrealizowane na bazie precyzyjnych wzmacniaczy operacyjnych i scalonych

wzmacniaczy pomiarowych, które posiadają rozbudowane struktury stopni wejściowych i stopnia różnicowego oraz układy do kalibracji [2]. Takie rozwiązania pozwalają osiągnąć małe błędy amplitudowe i fazowe oraz dużą wartość współczynnika tłumienia napięcia wspólnego, większą od 100 dB [2], w paśmie częstotliwości akustycznych.

W artykule przedstawiono wyniki prac związanych z opracowaniem dwukanałowego bufora przeznaczonego do budowania w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego systemu pomiarowego do wzorcowania rezystorów wzorcowych o małych wartościach rezystancji w zakresie częstotliwości akustycznych.

2. Rola bufora w systemie wzorcowania rezystorów

Koncepcja opracowanego systemu pomiarowego do wzorcowania rezystorów wzorcowych o małych wartościach rezystancji (rys. 1) oparta została na metodzie bezpośredniego porównania impedancji rezystora wzorcowanego R_X z rezystorem wzorcowym R_N . W systemie wyznaczany jest stosunek impedancji rezystorów R_X i R_N przez pomiar zespolonego stosunku napięć \underline{U}_X i \underline{U}_N . Do pomiaru napięć \underline{U}_X i \underline{U}_N zastosowano próbkujący moduł pomiarowy wchodzący w skład systemu pomiarowego zrealizowanego na bazie kasy NI PXI 1036DC [3]. W celu zapewnienia poprawnych warunków pomiaru dwóch "pływających" napięć \underline{U}_X i \underline{U}_N przez moduł pomiarowy posiadający wejścia niesymetryczne należało zastosować stopnie pośrednie (bufory), których napięcia wyjściowe \underline{U}_1 i \underline{U}_2 będą mogły posiadać wspólny potencjał odniesienia. W systemie zrealizowano dwa warianty stopnia pośredniego. Jeden wariant został zrealizowany na bazie transformatorów pomiarowych [4], a w drugim rozwiązaniu zastosowano wzmacniacze pomiarowe.



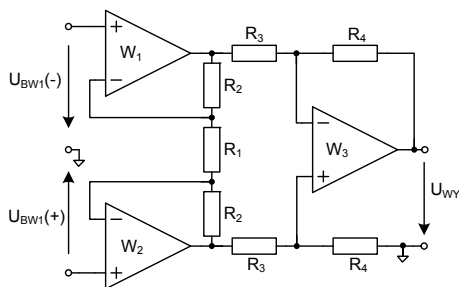
Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy systemu do wzorcowania rezystorów
Fig. 1. Simplified block diagram of the system for resistors calibration

Bufor powinien spełniać następujące założenia: wejście różnicowe, współczynnik CMMR ≥ 130 dB w paśmie pomiarowym (40 Hz ÷ 10 kHz), zakres napięć wejściowych: 0,01 V ÷ 1 V wartości skutecznej, małe i jednakowe dla obu kanałów wartości błędu wzmocnienia i błędu fazy, współczynniki wzmocnienia w obu kanałach równe 1, duża i jednakowa w obu kanałach wartość impedancji wejściowej.

3. Konstrukcja wzmacniacza

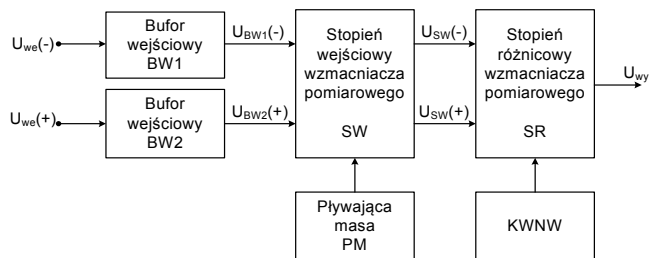
Klasyczny układ wzmacniacza pomiarowego [1] przedstawiono na rys. 2. W strukturze tego wzmacniacza występuje stopień wejściowy zrealizowany na bazie wzmacniaczy operacyjnych W_1 i W_2 oraz stopień wzmacniacza różnicowego zrealizowany na bazie wzmacniacza operacyjnego W_3 . Zakładając, że wzmacniacze operacyjne są idealne oraz wartości rezystorów R_2 , R_3 i R_4 są jednakowe współczynnik wzmocnienia takiego wzmacniacza określony jest zależnością:

$$k_{ur} = \frac{U_{WY}}{U_{BW1(+)} - U_{BW1(-)}} = \left(1 + \frac{2 \cdot R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (1)$$



Rys. 2. Schemat ideowy typowego wzmacniacza pomiarowego
Fig. 2. Typical setup of an Instrumentation Amplifier

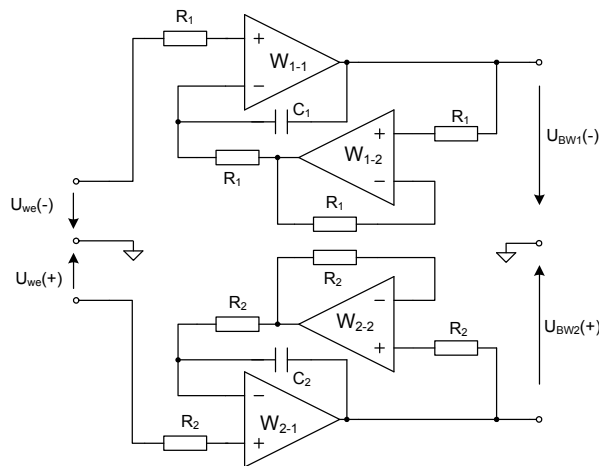
Zrealizowany układ bufora, którego uproszczony schemat blokowy przedstawiono na rys. 3, bazuje na strukturze wzmacniacza pomiarowego przedstawionego na rys. 2. W stosunku do podstawowej konfiguracji wzmacniacza pomiarowego w układzie bufora zastosowano dodatkowe bufory wejściowe (BW1, BW2), układ „pływającej masy” dla stopnia wejściowego (PM), rozbudowany stopień różnicowy (SR) oraz układ do kalibracji wzmacnienia napięcia wspólnego (KWNW). Bufory wejściowe BW1 i BW2 (rys. 4) są jednakowymi układami mającymi na celu zapewnić wysokiej impedancji wejściowej kompletnego bufora. W każdym z buforów zastosowano podwójne wzmacniacze operacyjne (W_{1-1} , W_{1-2}) typu OPA 2209 o impedancji wejściowej $1\text{G}\Omega|2\text{pF}$. W celu zmniejszenia błędów amplitudowych i fazowych oraz poszerzenia pasma przetwarzania wzmacniaczy zastosowanych w tych buforach, zrealizowano aktywne sprzężenie zwrotne realizujące kompensację charakterystyk częstotliwościowych wzmacniaczy – drugiego rzędu [5].



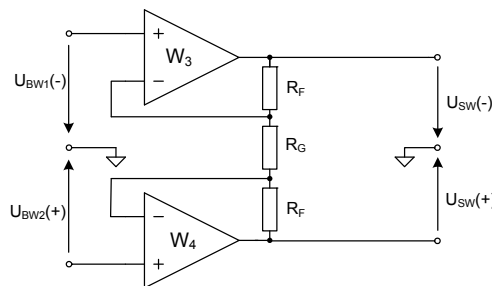
Rys. 3. Schemat blokowy wykonanego wzmacniacza pomiarowego
Fig. 3. Realized structure of Instrumentation Amplifier

Stopień wejściowy wzmacniacza pomiarowego SW i stopień różnicowy SR tworzą klasyczną konfigurację wzmacniacza pomiarowego [1]. W stopniu wejściowym SW (rys. 5) zastosowano wzmacniacze operacyjne typu OPA 228 (W_3 , W_4), charakteryzujące się dużą wartością współczynnika tłumienia sygnału wspólnego CMRR na poziomie 138 dB, z zewnętrznymi rezystorami o tolerancji 0.01% i współczynniku temperaturowym rezystancji 0,2 ppm. Zasilanie stopnia wejściowego SW zrealizowano w układzie tzw. „pływającej masy” PM. Na rys. 6 przedstawiono schemat ideowy układu zasilania stopnia wejściowego [6]. Zastosowano do tego celu układy pomocniczych wzmacniaczy operacyjnych typu OPA 404 (W_{5-1} - W_{5-4}) i scalonych źródeł prądowych typu REF200 o wydajności 100 μA . Stopień różnicowy SR (rys. 7) zrealizowano na bazie monolitycznego wzmacniacza różnicowego typu AD8274 (W_6) charakteryzującego się dużą wartością CMRR. W celu uzyskania współczynnika wzmocnienia kompletnego bufora $k_{ur}=1$ ustalono wzmocnienie stopnia wejściowego równe $(1+2R_2/R_1) = 2$, a stopnia różnicowego: $R_4/R_3=0,5$. W stopniu różnicowym wzmacniacza SR zastosowano układ kalibracji napięcia wspólnego KWNW [2]. W konstrukcji bufora zastosowano elementy do montażu powierzchniowego. Do zasilania bufora

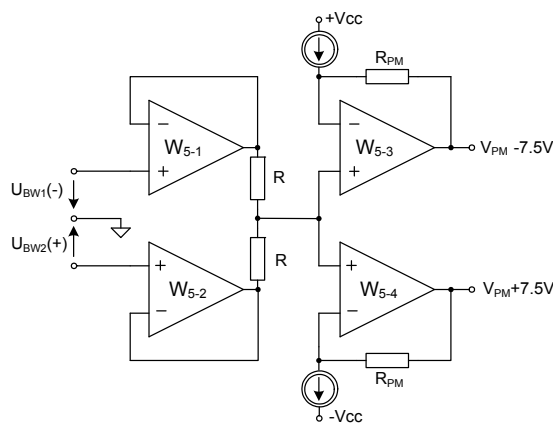
zastosowano dwa symetryczne napięcia o wartości $\pm 12\text{V}$ pochodzące ze źródła akumulatorowego.



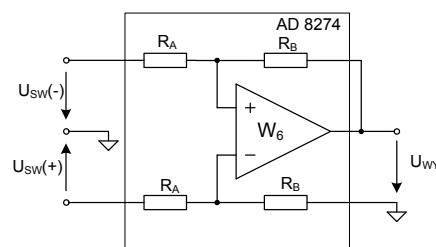
Rys. 4. Schemat ideowy bufora wejściowego BW
Fig. 4. Schematic diagram of input buffer BW



Rys. 5. Schemat ideowy stopnia wejściowego SW
Fig. 5. Schematic diagram of the input stage SW



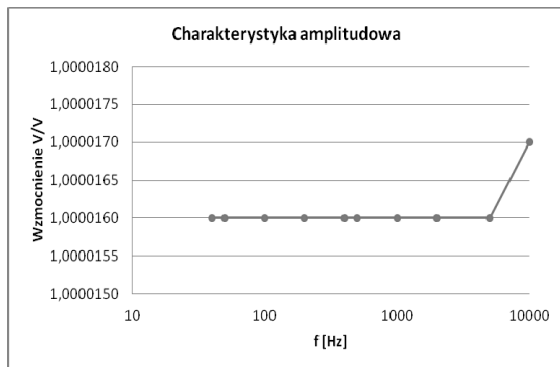
Rys. 6. Schemat układu zasilania PM stopnia wejściowego SW
Fig. 6. “Floating ground” power supply circuit of input stage SW



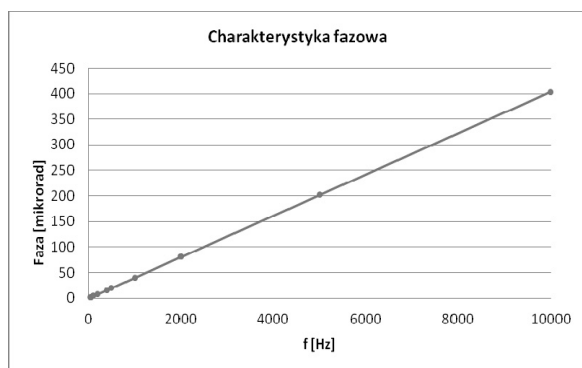
Rys. 7. Schemat ideowy stopnia różnicowego SR
Fig. 7. Schematic diagram of the difference stage SR

4. Wyniki badań

Przeprowadzono badania buforów wejściowych BW1 i BW2 zbudowanych na bazie podwójnych wzmacniaczy operacyjnych typu OPA2209. Wyznaczono częstotliwościowe charakterystyki amplitudowe i fazowe tych buforów w paśmie częstotliwości 40÷10000 Hz. Pomiary przeprowadzono w cyfrowym systemie pomiarowym przeznaczonym do pomiaru zespolonego stosunku napięć [3]. Na rys. 8 i rys. 9 przedstawiono charakterystyki amplitudową i fazową jednego z buforów wejściowych.

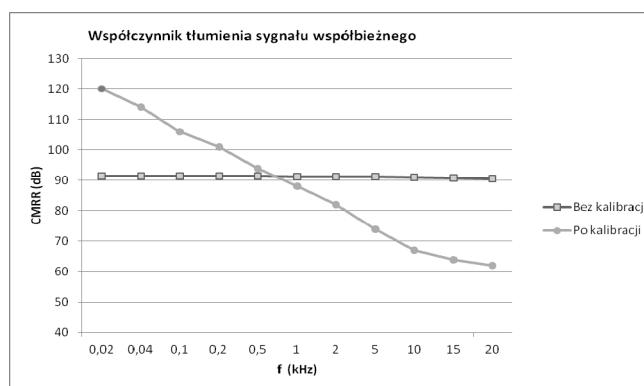


Rys. 8. Charakterystyka amplitudowa bufora wejściowego BW1
Fig. 8. Amplitude characteristic of input Buffer BW1



Rys. 9. Charakterystyka fazowa bufora wejściowego BW1
Fig. 9. Phase characteristic of input buffer BW1

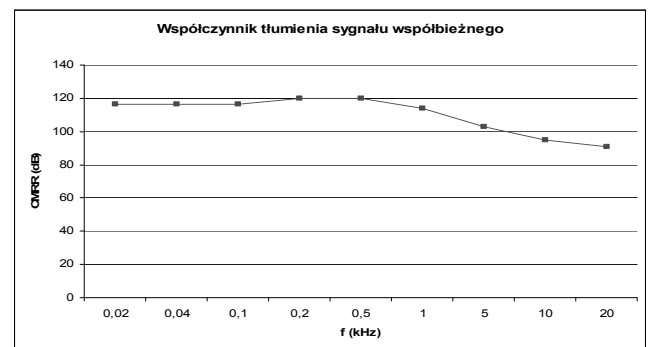
Charakterystyki częstotliwościowe drugiego bufora wejściowego są bardzo zbliżone. Błędy amplitudowe obu buforów różnią się na poziomie poniżej 1 ppm, a błędy fazowe buforów różnią się na poziomie pojedynczych mikroradianów, przy częstotliwości 10 kHz.



Rys. 10. Charakterystyka częstotliwościowa współczynnika tłumienia sygnału współbieżnego CMRR
Fig. 10. Frequency characteristics of CMRR

Na rys. 10 przedstawiono częstotliwościowe charakterystyki współczynnika tłumienia sygnału współbieżnego CMRR kom-

pletnego wzmacniacza z układem aktywnej kalibracji składowej rzeczywistej wzmocnienia napięcia wspólnego i bez tego układu. Zrealizowany układ kalibracji pozwolił na uzyskanie współczynnika tłumienia sygnału współbieżnego na poziomie 120 dB przy niskich częstotliwościach. Na rys. 11 przedstawiono częstotliwościowe charakterystyki współczynnika tłumienia sygnału współbieżnego kompletnego wzmacniacza po zastosowaniu biernej kalibracji składowej urojonej wzmocnienia napięcia wspólnego. Uzyskano w ten sposób współczynnik wzmocnienia napięcia wspólnego na poziomie 120 dB w paśmie do 500 Hz.



Rys. 11. Charakterystyka częstotliwościowa współczynnika tłumienia sygnału współbieżnego
Fig. 11. Frequency characteristics of CMRR

5. Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki prac dotyczących opracowania konstrukcji dwukanałowego wzmacniacza pomiarowego (bufora) przeznaczonego do pomiaru dwóch napięć „pływających” przez układ posiadający asymetryczne wejścia. W konstrukcji wzmacniacza zastosowano precyzyjne wzmacniacze operacyjne i scalony wzmacniacz różnicowy. Stopnie wejściowe obu kanałów bufora posiadają małe i jednakowe błędy wzmocnienia oraz małe i jednakowe błędy fazowe. Różnica błędów wzmocnienia w paśmie do 10 kHz nie przekracza 1 ppm, a różnica błędów fazowych nie przekracza pojedynczych mikroradianów. Po zastosowaniu korekcy składowej rzeczywistej i urojonej wzmocnienia napięcia wspólnego uzyskano współczynnik tłumienia napięcia wspólnego na poziomie 120 dB w paśmie do 500 Hz. W ramach dalszych prac planuje się wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych impedancji wejściowej oraz błędów wzmocnienia i błędów fazowych kompletnego wzmacniacza. Planuje się również rozbudowę stopnia różnicowego mającą na celu zwiększenie pasma przetwarzania kompletnego wzmacniacza.

6. Literatura

- [1] Kitchin C., Counts L.: A designer guide to instrumentation amplifiers, 3-rd edition Analog Devices, 2006.
- [2] Mohns E.: Instrumentation Amplifiers with Improved Accuracy for the Audio Frequency Range. Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2012 Conference on, pp. 304-305, 2012.
- [3] Rybski R, Kaczmarek J., Kozioł M.: Characterization of a digitizer for a low value resistor calibration system in the audio-frequency band. CPEM 2012 Conf. Digest, Washington, July 2012, s. 580 – 581.
- [4] Rybski R, Kaczmarek J., Kozioł M.: Aktywny transformator izolujący do zastosowań w pomiarach dokładnych w paśmie akustycznym. PAK, Vol. 59, nr 4, 2013.
- [5] Wong J.: Active Feedback Improves Amplifier Phase Accuracy, Application Note AN-107, Analog Devices.
- [6] Stitt M. R.: Boost instrument amp cmr with common driven supplies. Application Bulletin AB-025, Burr-Brown.