

Mykhaylo DOROZHOVETS¹, Anton PRYGRODSKY², Kazimierz BRYDAK¹

¹ POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW DIAGNOSTYCZNYCH, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

² NARODOWY UNIWERSYTET „LVIVSKA POLITECHNIKA”, ul. Bandery 12, 79013 Lviv, Ukraina

Badania dokładności różnicowego wzmacniacza z cyklicznie przełączanymi rezystorami sprzężenia zwrotnego w tomografii elektrycznej

Prof. dr hab. inż. Mykhaylo DOROZHOVETS

Jest absolwentem (1975) Katedry Techniki Informatyczno-Pomiarowej Politechniki Lwowskiej, w 2001 r. obronił pracę habilitacyjną. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku profesora zwyczajnego w Katedrze Metrologii i Systemów Diagnostycznych Politechniki Rzeszowskiej. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się analizą i oceną niepewności wyników pomiarów, zagadnieniami pomiarów tomograficznych oraz problemami przetwarzania sygnałów pomiarowych. Opublikował ponad 240 prac naukowych oraz 6 podręczników.

e-mail: michdor@prz.edu.pl



Mgr inż. Kazimierz BRYDAK

Jest absolwentem (1978) Wydziału Elektrycznego Politechniki Rzeszowskiej – specjalność metrologia i automatyka. Zatrudniony jest na stanowisku starszego wykładowcy w Katedrze Metrologii i Systemów Diagnostycznych. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się zagadnieniami pomiarów tomograficznych i problemami przetwarzania sygnałów pomiarowych w mikrokontrolerach analogowych.

e-mail: brydak@prz.eu.pl



Mgr inż. Anton PRYGRODSKY

Jest absolwentem (2009) Katedry Technologii Informatyczno-Pomiarowych Politechniki Lwowskiej. Obecnie jest studentem studiów doktoranckich (Politechnika Lwowska) oraz zatrudniony na stanowisku inżyniera w firmie komputerowej. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się zagadnieniami pomiarów w tomografii elektrycznej.

e-mail: prygodsky.anton@gmail.com



Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę zwiększania dokładności współczynnika wzmocnienia wzmacniacza różnicowego stosowanego w tomografii impedancyjnej, w której występuje duża dynamika zmian sygnałów pomiarowych oraz obserwuje się stosunkowo niski poziom wrażliwości wyników pomiaru na zmiany przewodności. Zaproponowano dwa układy pomiarowe wzmacniacza różnicowego realizujące metodę dynamicznego wzmocnienia poprzez zastosowanie w sprzężeniu zwrotnym układu szeregowego cyklicznie przełączanych rezystorów (rys. 2) oraz układu z gałęziami równolegle połączonych rezystorów sprzężenia zwrotnego (rys. 3). Przedstawiono analizę charakterystyki błędu współczynnika wzmocnienia dla proponowanych układów pracy wzmacniacza metodą symulacyjną Monte Carlo. W pracy wykazano, że przy wykorzystaniu rezystorów o stosunkowo niskiej dokładności można uzyskać niski poziom względnego błędu współczynnika wzmocnienia.

Słowa kluczowe: tomografia impedancyjna, współczynnik wzmocnienia, wzmacniacz różnicowy, sprzężenie zwrotne.

Investigations of the accuracy of a differential amplifier with cyclically switched parallel feedback resistors used in electrical tomography

Abstract

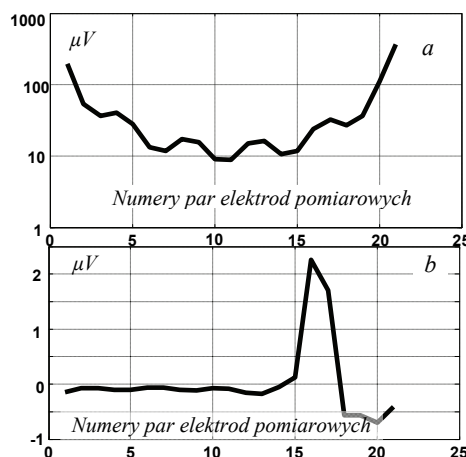
This paper presents a method for increasing the gain accuracy of a differential amplifier used in electrical tomography in which there occurs large dynamics of measurement signal changes and there is observed a relatively low sensitivity level of measurement results to electrical conductivity (Fig.1). The differential amplifier with switched parallel resistors in a feedback circuit is proposed. It uses the dynamic element matching method. The resistive feedback circuit consists of two symmetrical parts with m and $k-m$ connected in parallel resistor branches (Fig. 3). The nominal resistances of all resistors are the same. The resistors of both parts ($R_{11}-R_{1k}$ and $R_{21}-R_{2k}$ (Fig. 3)) are cyclically switched to one position and during a full cycle the feedback has k states. Hence, the mean value and standard deviation of the relative error of this amplifier average gain are proportional to the square of the resistor standard deviation (formulas (3)). The simulation results (using the Monte Carlo method) show that even use of relatively inaccurate resistors of $\delta R = \pm 0,1\%$ provides the amplifying of a differential signal with the mean error of 0,3–3 ppm (Fig. 4). As was mentioned above, there cannot be noted any significant

impact on the switched resistance gain accuracy, especially for higher gains. Use of parallel resistor connections in feedback circuits of an amplifier decreases significantly the number of switches needed for resistor rotation. Obviously, the dynamic element matching method has another disadvantage: there is needed more time (multiplied by factor K_{nom}) to obtain the accurate input signal gain, which limits the input signal bandwidth.

Keywords: electrical tomography, gain, differential amplifier, feedback.

1. Wstęp

Tomografia elektryczna wykorzystywana jest do otrzymywania informacji o przestrzennym rozkładzie przewodności $\gamma(x, y)$ w badanym środowisku [1]. Badany obiekt, poprzez elektrody umieszczone na obrzeżu, pobudzany jest prądem (lub napięciem) oraz mierzone są odpowiednie, różnicowe napięcia międzyelektrodowe (lub prądy elektrodowe). Jedną z osobiwości pomiarów w tomografii elektrycznej jest bardzo szeroki zakres zmian wielkości mierzonej [1]. Stosunek maksymalnej wartości wielkości mierzonej do minimalnej może sięgać od 10 do 1000. Przykładowo przy stałej wartości przewodności w 24 elektrodowym systemie pomiarowym stosunek napięć różnicowych sięga ponad 64 (rys. 1a). Oprócz tego, informacyjna zmiana wartości napięć, spowodowana zmianą poszukiwanej przewodności, jest od 1 do 2-ch rzędów mniejsza od wartości samych różnicowych napięć międzyelektrodowych (rys.1b).



rys. 1. Pomiarowe napięcia różnicowe (a) oraz informacyjna zmiana tych napięć spowodowana zmianą przewodności o 100% w jednoprocentowym obszarze w części środkowej obiektu (b)

Fig. 1. Measured differential voltages (a) and voltage changes caused by the 100% conductivity change in 1% area in the object central part (b)

Przyczyną takiej sytuacji jest to, że w tomografii elektrycznej obserwuje się bardzo niski poziom wrażliwości wyników pomiaru

na zmiany przewodności, przy tym, w największym stopniu wartości mierzonych napięć reagują na zmiany przewodności zewnętrznych obszarów obiektu badanego, a reakcja na zmiany przewodności w obszarach wewnętrznych jest zdecydowanie (nawet o kilka rzędów) mniejsza. Algorytm rekonstrukcyjny rozwiązujący odwrotne zagadnienie, w postaci jawnej lub niejawnej, oblicza pochodne wyników pomiaru [2]. Dlatego wpływ wartości wzmacnienia w układzie pomiarowym i oddziaływań nie tylko losowych, a i systematycznych, jest bardzo duży i może sięgać od 100 do 1000 [2]. Z kolei wiąże się to z wymaganiami bardzo wysokiej dokładności torów pomiarowych z punktu widzenia wpływu występujących w nich oddziaływań, zwłaszcza podczas wzmacniania sygnałów i ich przetwarzania analogowo-cyfrowego.

Jeśli na przykład, stosunek zakresu zmian napięć różnicowych wynosi 64, wtedy podczas przetwarzania analogowo-cyfrowego „małych” napięć bez wzmacnienia traci się 6-bitów rozdzielczości przetwornika A/C. Przy wykorzystaniu 16 bitowego przetwornika A/C ekwiwalentna rozdzielczość wyników przetwarzania „małych” napięć wynosi więc tylko 10 bitów! W celu uniknięcia tego problemu należy wzmacniać napięcia mierzone, w przybliżeniu, do tego samego poziomu – zakresu przetwarzania przetwornika A/C.

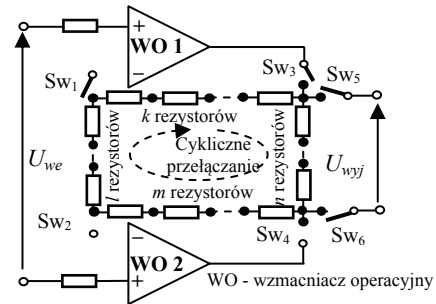
Nieco inna jest sytuacja z wpływem oddziaływań multiplikatywnych podczas wzmacniania sygnałów pomiarowych. W [2] zostało pokazano, że jednakowe we wszystkich wynikach pomiaru oddziaływania multiplikatywne (związane z niedokładnością współczynnika wzmacnienia toru pomiarowego) nie są wzmacniane przez algorytm. Na przykład, jeśli względny błąd wszystkich współczynników wzmacnienia będzie wynosił nawet +1%, wtedy błąd rekonstrukcji, spowodowany tym błędem, będzie wynosił też 1%, co w pewnych wypadkach może być akceptowane. Jednak, jeśli podczas zmiany współczynnika wzmacnienia, względny błąd różnych wartości wzmacnienia nie jest stały, na przykład dla czterech wartości współczynnika ich błędy wynoszą odpowiednio: +0,1%, +0,05%; -0,05% oraz -0,1%, wtedy błąd rekonstrukcji (w wyniku efektu wzmacnienia różnic błędów napięć około 100 a nawet 1000 razy [2]) może osiągać wartości nawet 10% do 100%, co nie może być akceptowane. Żeby osiągnąć błąd rekonstrukcji obrazu na poziomie 0,1% - 1,0 %, niejednakowość błędów różnych wartości współczynnika wzmacnienia powinna być na poziomie nawet 0,0001% - 0,001% (1 - 10 ppm).

Celem badań jest opracowanie metody zwiększenia dokładności współczynnika wzmacnienia różnicowego wzmacniacza z równoległymi cyklicznie przełączanymi rezystorami o stosunkowo niedużej dokładności

2. Dynamiczne wzmacnienie sygnału różnicowego

Problem budowy wzmacniacza o dokładnym współczynniku wzmacnienia na rezystorach sprzężenia zwrotnego niewysokiej dokładności bazuje na realizacji metody dynamicznego wzmacnienia przedstawionej w pracach [3] – [5]. Sprężenie zwrotne wzmacniacza różnicowego (rys. 2) wykonano w postaci zamkniętego obwodu z szeregowym połączeniem $N = k + m + n + l$ ($N \geq 4, m \geq 1, l \geq 1, n \geq 1$) rezystorów o nominalnie jednakowych rezystancjach, które dynamicznie są wymieniane miejscami: cyklicznie przełączane z przesunięciem o jedną pozycję [3]. Nominalny współczynnik wzmacnienia zależy tylko od liczby rezystorów w gałęziach obwodu [5] $K_{i, nom} = (N - n) / l$. W każdej pozycji przełączników rezystorów sygnał z wyjścia wzmacniacza przetwarzany jest za pomocą przetwornika A/C. Po ostatniej cyklicznej wymianie miejsc rezystorów otrzymane wyniki przetwarzania napięć wyjściowych są uśredniane. Współczynnik wzmacnienia sygnału wejściowego równa się zatem wartości średniej współczynników wzmacnienia K_j w każdej z N pozycji rezystorów:

$$K = \bar{K} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N K_j \quad (1)$$



Rys. 2. Różnicowy wzmacniacz z dynamicznym cyklicznym przełączeniem szeregowego sprzężenia zwrotnego

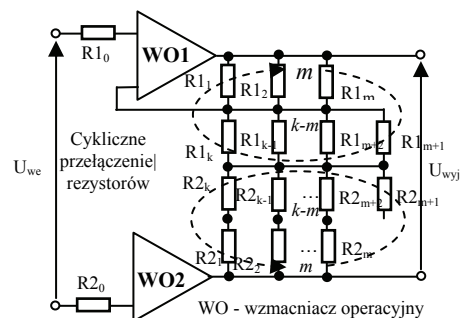
Fig. 2. The differential amplifier with dynamic-feedback switched serial resistor circuit

W [6] pokazano, że wartość oczekiwana i standardowe odchylenie względnego błędu wartości średniej współczynnika wzmacnienia (1) proporcjonalne są do kwadratu względnego standardowego odchylenia rezystancji rezystorów $\sigma^2(\delta_R)$, dlatego są one są wartościami małymi drugiego rzędu.

Jednak wadą takiego wzmacniacza jest wykorzystanie zbyt dużej liczby kluczy do cyklicznego przełączenia rezystorów sprzężenia zwrotnego. Przy maksymalnej wartości współczynnika wzmacnienia K_{max} ich liczba wynosi: $6 \cdot (K_{max} + 1)$.

3. Wzmacniacz z równoległymi gałęziami sprzężenia zwrotnego

Innym proponowanym rozwiązaniem budowy pierwszego stopnia wzmacniacza instrumentalnego jest wykorzystanie równoległych połączeń rezystorów w gałęziach sprzężenia zwrotnego (rys. 3). Sprężenie zwrotne wzmacniacza zawiera dwie symetryczne gałęzie o m równoległe połączonych rezystorach podłączonych do wyjść wzmacniaczy operacyjnych $R1_1 - R1_m$ oraz $R2_1 - R2_m$ oraz dwie gałęzie o $k - m$ równoległe połączonych rezystorach: $R1_{m+1} - R1_k$ oraz $R2_{m+1} - R2_k$ ze wspólnym punktem (rys. 3) – sumarycznie w każdej parze gałęzi wykorzystuje się $k - m$ rezystorów. Przełączniki (nie są pokazane na rys. 3) podłączają odpowiednie rezystory do wyjścia odpowiedniego wzmacniacza operacyjnego lub do wspólnego punktu. Nominalny współczynnik wzmacnienia takiego wzmacniacza zależy tylko od liczby rezystorów w odpowiednich gałęziach sprzężenia zwrotnego i opisany jest wzorem: $K_{nom} = k / m$.



Rys. 3. Wzmacniacz różnicowy z gałęziami równoległe połączonych rezystorów sprzężenia zwrotnego

Fig. 3. The differential amplifier with switched parallel resistor feedback circuit

Podstawowymi zaletami takiego układu wzmacniacza jest istotnie mniejsza liczba przełączników, która równa się liczbie wykorzystanych rezystorów ($2k$), a także możliwość wykorzystania nie wszystkich, a tylko minimalnie potrzebnych rezystorów sprzężenia zwrotnego w zależności od wymaganej wartości współczynnika wzmacnienia.

Ponieważ przełączniki włączane są szeregowo do rezystorów, dlatego rezystancja przełączników (głównie niestabilność ich

rezystancji) będą wpływały na wartości współczynników wzmocnienia, co jest wadą tego układu. Wpływ rezystancji przełączników można sprowadzić do dopuszczalnego poziomu poprzez dobór odpowiedniej nominalnej wartości rezystancji rezystorów, takiej, żeby względny wpływ rezystancji przełączników był porównywalny (a nawet mniejszy) od odchyłań (rozrzutu) wartości rzeczywistych rezystancji od nominalnej.

4. Analiza charakterystyk błędu współczynnika wzmocnienia

Analizując najprostszy przypadek wzmacniacza z dwoma rezystorami R_{11}, R_{12} oraz R_{21}, R_{22} w każdej części sprzężenia zwrotnego, to jest przy $k=2$ oraz $m=1$, nominalny współczynnik wzmocnienia takiego wzmacniacza równa się $K_{nom} = k/m = 2$. Ponieważ rzeczywiste wartości rezystancji różnią się od nominalnych, dlatego wartość rzeczywista współczynnika wzmocnienia wynosi:

$$K_1 = \frac{R_{11} + R_{12} + R_{21} + R_{22}}{R_{12} + R_{22}} = \frac{4 + \delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{21} + \delta_{22}}{2 + \delta_{12} + \delta_{22}}.$$

Jeśli w drugim pomiarze rezystory zostaną wymienione miejscami: $R_{11} \leftrightarrow R_{12}$ oraz $R_{21} \leftrightarrow R_{22}$, wtedy wartość rzeczywista współczynnika wzmocnienia wynosi:

$$K_2 = \frac{4 + \delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{21} + \delta_{22}}{2 + \delta_{11} + \delta_{21}}.$$

Względny błąd wartości średniej współczynnika wzmocnienia opisywany jest wzorem:

$$\delta_{K_{sr}} = \frac{K_{cp} - 2}{2} \approx \left(\frac{\delta_{11} + \delta_{21} - \delta_{12} - \delta_{22}}{4} \right)^2. \quad (2)$$

Jeśli wartości względnych odchyłań rezystancji rezystorów od wartości nominalnej nie są wzajemnie skorelowane: $E[\delta_i \delta_j] - E[\delta_i]E[\delta_j] = 0$, wtedy wartość oczekiwana i standardowe odchylenie względnego błędu wartości średniej współczynnika wzmocnienia są równe:

$$M[\delta_{K_{sr}}] = \frac{\sigma_R^2}{4}, \quad \sigma(\delta_{K_{sr}}) = \sqrt{\frac{\mu_{4,R} + 5\sigma_R^4}{64}} = \frac{\sigma_R^2}{8} \sqrt{\varepsilon^2 + 5}, \quad (3)$$

gdzie σ_R^2 , $\mu_4(\delta_R)$ są odpowiednio wariancją i momentem czwartego rzędu rozkładu prawdopodobieństwa względnych odchyłań rezystancji od wartości nominalnej; $\varepsilon = \sqrt{\mu_4(\delta)}/\sigma^2(\delta)$ - jest kurtozą rozkładu ($\varepsilon = 1,8$ dla rozkładu jednostajnego oraz $\varepsilon = 3$ dla rozkładu normalnego).

Z zależności (3) wynika, że wartość oczekiwana błędu względnego wartości średniej współczynnika wzmocnienia jest dodatnia i oprócz tego tak wartość oczekiwana jak i standardowe odchylenie są proporcjonalnymi do kwadratu standardowego odchylenia względnego odchylenia rezystancji rezystorów od wartości nominalnej. Oznacza to, że są one również wartościami małymi drugiego rzędu.

5. Wyniki badań charakterystyk błędu współczynnika wzmocnienia metodą Monte Carlo

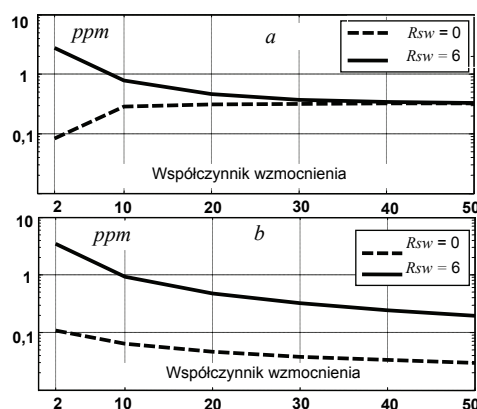
Dokładne badania charakterystyk względnego błędu wartości średniej współczynnika wzmocnienia wzmacniacza różnicowego z gałęziami równoległe połączonych rezystorów sprzężenia zwrotnego (rys. 3) zostały przeprowadzone metodą symulacyjną.

Nominalne wartości współczynnika wzmocnienia zostały zmieniane w kolejności: $K_{nom} = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ oraz $2, 10, 20, 30, 40, 50, 100$. Nominalne rezystancje rezystorów wynosiły $R_{nom} = 50k\Omega$. Wartości graniczne względnych odchyłań rezystancji rezystorów od wartości nominalnej równe są $\delta_{R,gr} \pm 1\%$ oraz $\pm 0,1\%$. Rezystancje kluczy R_{kl} wynosiły 0Ω oraz 6Ω z rozrzutem $\delta_{R,kl} = \pm 20\%$. Przeprowadzono $M = 10^5$ symulacji metodą Monte Carlo. Rezultaty badań dla $\delta_{R,gr} = \pm 0,1\%$ przedstawiono na rys. 4.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że przy wykorzystaniu rezystorów stosunkowo nie wysokiej dokładności ($0,1\%$) metodą dynamicznego przełączenia równoległych rezystorów sprzężenia zwrotnego można otrzymać niski poziom względnego błędu współczynnika wzmocnienia: poniżej $5 ppm$.

Wykorzystanie równoległe połączonych rezystorów w sprzężeniu zwrotnym do realizacji ich cyklicznego przełączenia wymaga istotnie mniejszej liczby przełączników, tylko $2k = 2 \cdot (K_{nom} - 1)$ zamiast $6 \cdot (K_{nom} + 1)$ wykorzystywanych we wzmacniaczu z szeregowym podłączeniem rezystorów [3].

Oczywistą wadą wzmacniacza z dynamicznym przełączeniem rezystorów jest zwiększenie w $k = (K_{nom} - 1)$ razy czasu dla otrzymania skorygowanej wartości wzmocnionego napięcia, co ogranicza szerokość pasma wzmacnianego sygnału.



Rys. 4. Wartość oczekiwana (a) oraz standardowe odchylenie (b) względnego błędu współczynnika wzmocnienia

Fig. 4. The expected value (a) and the standard deviation (b) of the average gain relative error

6. Literatura

- [1] Dorozhovets M., Kowalczyk A.: Badania schematów dualnych pomiaru sygnałów czujników wieloelektrodowych w tomografii impedancyjnej. XI sympozjum Modelowanie i symulacja systemów pomiarowych. Krynica, 17-21 września, 2001, s. 113-120.
- [2] Dorozhovets M., Brydak K., Prygrodsky A.: Analiza wpływu oddziaływań addytywnych i multiplikatywnych na niepewność rekonstruowanego obrazu przewodności w tomografii elektrycznej. VIII konferencja naukowo-techniczna: Podstawowe Problemy Metrologii 2011. Krynica, 12-15 czerwca 2011 r.
- [3] Smart sensor systems. Edited by Gerard C. M. Mejer. John Wiley and Sons Ltd. 2008. 385 p.
- [4] De Jong P.C., Mejer G.C.M., van Roermund A.H.M.: A dynamic-feedback instrumentation amplifier. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 33. 1999.
- [5] Wang G., Mejer G.C.M.: Accurate DEM SC amplification of small differential-voltage signal with CM level from ground to VDD. In SPIE 2000, Newport Beach USA. 2000.
- [6] Dorozhovets M.: Analiza dokładności wzmacniacza z rezystancyjnym dynamicznym sprzężeniem zwrotnym. VIII konferencja naukowo-techniczna: Podstawowe Problemy Metrologii 2012. Krynica, 4-7 czerwca 2012 r.