

**Mykhaylo DOROZHOVETS**POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW DIAGNOSTYCZNYCH  
ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów**Badania błędu współczynnika wzmocnienia wzmacniaczy z rezystancyjnym dynamicznym sprzężeniem zwrotnym**

Prof. dr hab. inż. Mykhaylo DOROZHOVETS

Jest absolwentem (1975) Katedry Techniki Informatyko-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.



e-mail: michdor@prz.edu.pl

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań względnego błędu współczynnika wzmocnienia trzech rodzajów wzmacniaczy (nieodwracającego, odwracającego oraz różnicowego) działających na zasadzie dynamicznego przełączania rezystorów sprzężenia zwrotnego. Wyprowadzono wzory na obliczenia wartości oczekiwanej i odchylenia standardowego względnego błędu wartości średniej współczynnika wzmocnienia w zależności od odchylenia standardowego i gęstości rozkładu względnych odchyleń rezystancji rezystorów sprzężenia zwrotnego oraz od wpływu rezystancji kluczy.

**Słowa kluczowe:** dokładność, wzmacniacz, sprzężenie zwrotne, dynamiczne.

**Research of the gain error of amplifiers with resistor dynamic-feedback****Abstract**

The analysis results of the amplification factor relative error of three kinds of amplifiers (non-inverting (Fig. 1,b), inverting (Fig. 2,a) and differential (Fig. 2,b)) based on resistors dynamic-feedback are presented in the paper. Such amplifiers are used for signal amplification in a wide dynamic range when, practically, the same value of the relative error of different amplification factors is required. It is shown that values of the mean and standard deviation of the mean amplification factor relative errors are proportional to the square of the resistance relative standard deviation: formulas (7), (8), (10). Moreover, it is shown that the mean error value do not practically depended on the number of used resistors. The error standard deviation decreases proportionally to the root square of the number of resistors. The characteristics of the amplification factor relative errors calculated by analytical formulas and by the Monte Carlo method for different number of feed-back resistors (from 2 to 100) are shown in Fig. 3. Based on the analysis of the influence of switch variation resistance on the amplification factor error, the condition (13) for correct choice of switches is obtained. It is shown that using resistors with the relative standard deviation of 0,1% and switches whose resistance deviation corresponds to the condition (13), it is possible to obtain the amplification factor accuracy of a few ppm.

**Keywords:** accuracy, amplifier, dynamic, feedback.

**1. Wstęp**

W wielu praktycznych przypadkach wartości sygnałów mierzonych mogą różnić się w dużym stopniu – kilkadziesiąt, kilkaset a nawet więcej razy. Przy czym informacja pomiarowa mieści się w stosunku tych napięć. Klasycznym przykładem jest wykorzystanie niezrównoważonego mostka Wheatstone'a z czujnikami tensometrycznymi rezystancyjnymi o względnej zmianie rezystancji rzędu 1%. Napięcia wyjściowe mostka i jego zasilania mogą różnić się nawet 100 razy. Podobna sytuacja ma miejsce przy pomiarach napięć międzyelektrodowych w tomografii elektrycznej [2]. Stosunek maksymalnej do minimalnej wartości napięć mierzonych też może wynosić kilkadziesiąt a nawet kilkaset [2]. Oprócz tego, często informacja pomiarowa o zmianach wiel-

kości mierzonej wewnątrz obiektu mieści się tylko w bardzo małej części wartości napięć mierzonych. Dlatego tor pomiarowy musi być bardzo dokładnym.

W celu zapewnienia dokładności pomiarów zwykle wykorzystuje się korekcję występujących w torze pomiarowym oddziaływań systematycznych addytywnych i multiplikatywnych. Ponieważ w takim modelu pomiarowym występują trzy wielkości nieznanne: wielkość mierzona oraz oddziaływania addytywne i multiplikatywne, dlatego co najmniej trzy wielkości powinny być mierzone w ten sam sposób i w tym samym zakresie pomiarowym: wielkość mierzona oraz dwie wielkości referencyjne. Skuteczna korekcja jest możliwa tylko przy niskim poziomie oddziaływań losowych, bardzo dobrej liniowości toru w całym zakresie pomiarowym oraz małej wartości kwantu w przetworniku analogowo-cyfrowym (A/C). Przy szerokim zakresie zmian napięć mierzonych doprowadzenie wpływu efektu kwantowania do zadanego poziomu zapewnia się poprzez wzmocnienie tych napięć do zakresu A/C. Jednak wtedy na każdym zakresie sygnału wejściowego (różne wartości współczynnika wzmocnienia) otrzymuje się inne wartości błędu multiplikatywnego, co uniemożliwia skuteczną korekcję oddziaływań systematycznych tak dla małych jak i dla dużych wartości sygnału.

W celu otrzymania dużej dokładności różnych wartości współczynnika wzmocnienia nawet przy stosunkowo niedokładnych rezystorach sprzężenia zwrotnego wzmacniacza w [1, 3, 4] została opracowana tak zwana metoda dynamicznego sprzężenia zwrotnego (dynamic-feedback).

**Zasada rezystancyjnego dynamicznego sprzężenia zwrotnego**

Metoda zapewnienia dużej dokładności współczynnika wzmocnienia polega na randomizacji oddziaływań multiplikatywnych z następnym ich uśrednianiem. W tym celu w sprzężeniu zwrotnym wzmacniacza wykorzystuje się odpowiednią liczbę szeregowo (lub równoległe) połączonych rezystorów o nominalnie jednakowej wartości rezystancji, które dynamicznie są zamieniane miejscami: cyklicznie przełączane z przesunięciem o jedną pozycję [1]. Liczba cykli  $k$  jest równa liczbie wykorzystywanych rezystorów, która z kolei zależy od wartości współczynnika wzmocnienia. W każdym cyklu napięcie wyjściowe wzmacniacza przetwarzane jest za pomocą dokładnego przetwornika A/C o dużej rozdzielczości. Skorygowany wynik pomiaru wzmoczonego napięcia jest obliczany jako wartość średnia cząstkowych wyników otrzymanych w każdym cyklu.

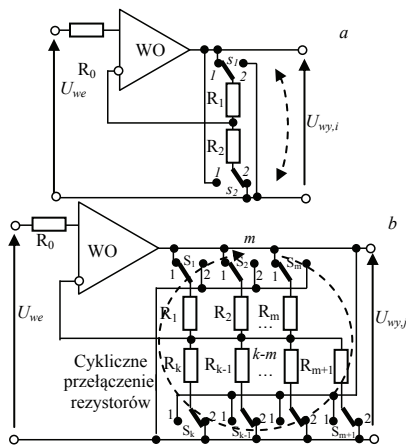
Zasada metody w najprostszym przypadku dla nieodwracającego wzmacniacza zbudowanego na wzmacniaczu operacyjnym (WO) ze sprzężeniem zwrotnym z dwóch rezystorów  $R_1, R_2$ , które są podłączane za pomocą kluczy  $S_1$  oraz  $S_2$ , jest przedstawiona na rys. 1.a. Przy jednakowych nominalnych wartości rezystancji rezystorów  $R_{1,nom} = R_{2,nom} = R_{nom}$  oraz przy pomijaniu rezystancji kluczy nominalny współczynnik wzmocnienia  $K_{nom} = 2$ . Założymy, że  $\delta_1, \delta_2$  są wartościami względnych odchyleń rezystancji od wartości nominalnej, wtedy rzeczywista wartość współczynnika wzmocnienia wynosi

$$K_1 = 2 \cdot \left( 1 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \right) / (1 + \delta_2) \text{ i jego błąd względny jest równy}$$

$$\delta_{K_1} = \frac{K_1 - K_{nom}}{K_{nom}} = \frac{(\delta_1 - \delta_2)}{2(1 + \delta_2)}$$

Jeśli w drugim pomiarze rezystory za pomocą kluczy zostaną zamienione miejscami  $R_1 \leftrightarrow R_2$  (rys. 1,a), wtedy rzeczywista wartość współczynnika wzmocnienia  $K_2$  i jego błąd względny  $\delta_{K_2}$  będą opisywane wzorami podobnymi z zamianą  $\delta_1 \leftrightarrow \delta_2$ . Wartość średnią współczynników wzmocnienia równa się  $K_{sr} = \frac{K_1 + K_2}{2} = 2 \cdot \frac{(1 + (\delta_1 + \delta_2)/2)^2}{(1 + \delta_1)(1 + \delta_2)}$  a jej błąd względny:

$$\delta_{K_{sr}} = \frac{(\delta_1 - \delta_2)^2}{4(1 + \delta_1)(1 + \delta_2)} \approx \left( \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \right)^2. \quad (1)$$



Rys. 1. Zasada wzmacniacza (a) oraz nieodwracający wzmacniacz (b) z rezystancyjnym dynamicznym sprzężeniem zwrotnym  
Fig. 1. The principle (a) and non-inverting amplifier (b) based on resistor dynamic-feedback

Jeśli wartości  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  nie są skorelowane ( $E[\delta_1\delta_2] - E[\delta_1]E[\delta_2] = 0$ ), wtedy wartość oczekiwana i odchylenie standardowe błędów wartości średniej współczynnika wzmocnienia są równe:

$$E[\delta_{K_{sr}}] = \frac{\sigma^2(\delta)}{2}, \quad (2)$$

$$\sigma(\delta_{K_{sr}}) = \sqrt{\frac{\mu_4(\delta) + \sigma^4(\delta)}{8}} = \frac{\sigma^2(\delta)}{2} \sqrt{\frac{1 + \varepsilon}{2}},$$

gdzie:  $\sigma^2(\delta)$ ,  $\mu_4(\delta)$  są odpowiednio wariancją i momentem czwartego rzędu rozkładu prawdopodobieństwa względnych odchyłek rezystancji od wartości nominalnej;  $\varepsilon = \mu_4(\delta)/\sigma^4(\delta)$  - jest kurtozą rozkładu;  $\mu_4(\delta) = 1,8 \sigma^4(\delta)$ ,  $\varepsilon = 1,8$  dla rozkładu jednostajnego oraz  $\mu_4(\delta) = 3\sigma^4(\delta)$ ,  $\varepsilon = 3$  dla rozkładu normalnego.

Ze wzorów (2) widać, że wartość oczekiwana oraz odchylenie standardowe względnego błędów współczynnika wzmocnienia proporcjonalne są do kwadratu względnego odchylenia standardowego rezystancji, dlatego one są wartościami małymi drugiego rzędu.

Celem następnych badań jest wyznaczanie wartości oczekiwanej i odchylenia standardowego względnego błędów współczynnika wzmocnienia trzech rodzajów wzmacniaczy z rezystancyjnym dynamicznym sprzężeniem zwrotnym w zależności od liczby rezystorów, parametrów ich dokładności oraz analiza wpływu rezystancji kluczy.

## 2. Wartość oczekiwana i odchylenie standardowe względnego błędów współczynnika wzmocnienia

W sprzężeniu zwrotnym **wzmacniacza nieodwracającego** (rys. 1, b) w postaci rezystancyjnego dzielnika napięcia wykorzystuje się  $m$  oraz  $k - m$  równoległe połączonych rezystorów (sumarycznie  $k$  rezystorów). Rezystory  $R_i$  sprzężenia zwrotnego za pomocą kluczy ( $S_1, \dots, S_k$ ) są podłączane do wyjścia wzmacniacza (poz. 1) lub do masy wspólnej (poz. 2). Nominalna wartość współczynnika wzmocnienia jest równa:

$K_{n,nom} = \sum_{i=1}^k G_{i,nom} / \sum_{j=1}^m G_{j,nom} = \frac{k}{m}$ . Rzeczywista (przy początkowym podłączeniu rezystorów jak na rys. 1, b) wartość współczynnika wzmocnienia opisana jest wzorem:

$$K_{n,1} = \frac{G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_m + \dots + G_k}{G_1 + G_2 + \dots + G_m} = \frac{k}{m} \cdot \frac{1 + \overline{\delta}_k}{1 + \overline{\delta}_{m,1}}, \quad (3)$$

gdzie:  $\overline{\delta}_k = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_k}{k}$ ,  $\overline{\delta}_{m,1} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_m}{m}$  są

odpowiednio wartościami średnimi względnymi odchyłek konduktancji ( $G_i = 1/R_i$ ) od wartości nominalnej  $G_{nom} = 1/R_{nom}$  wszystkich  $k$  oraz pierwszych  $m$  rezystorów. Dla początkowego podłączenia rezystorów wyrażenie względnego błędów współczynnika wzmocnienia ma postać:

$$\delta_{K_{n,1}} = \frac{K_{n,1} - K_{n,nom}}{K_{n,nom}} = \frac{1 + \overline{\delta}_k}{1 + \overline{\delta}_{m,1}} - 1 \approx (\overline{\delta}_k - \overline{\delta}_{m,1}) (1 - \overline{\delta}_{m,1}). \quad (4)$$

W celu zmniejszenia wpływu niedokładności rezystorów realizuje się cykliczne przełączanie rezystorów sprzężenia zwrotnego za każdym razem o jeden:  $R_1 \rightarrow R_2$ ,  $R_2 \rightarrow R_3$ ,  $R_3 \rightarrow R_4$ , ...,  $R_{k-1} \rightarrow R_k$ ,  $R_k \rightarrow R_1$ . W  $j$ -m cyklu przełączenia wartość rzeczywista współczynnika wzmocnienia oraz jego błąd względny opisywane są wzorami podobnymi do wzorów (3) oraz (4):

$$K_{n,j} = \frac{k}{m} \cdot \frac{1 + \overline{\delta}_k}{1 + \overline{\delta}_{m,j}}, \quad \overline{\delta}_{m,j} = \frac{\delta_j + \delta_{j+1} + \dots + \delta_{\text{mod}(j+m,k)}}{m}, \quad (5)$$

$$\delta_{K_{n,j}} = \frac{\overline{\delta}_k - \overline{\delta}_{m,j}}{1 + \overline{\delta}_{m,j}} \approx (\overline{\delta}_k - \overline{\delta}_{m,j}) (1 - \overline{\delta}_{m,j}).$$

Wartość średnia współczynnika wzmocnienia wynosi:

$K_{n,sr} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k K_{n,j}$ . Na podstawie (5) względny błąd wartości średniej współczynnika wzmocnienia można opisać wzorem:

$$\delta_{K_{n,sr}} \approx \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\overline{\delta}_{m,j})^2 - (\overline{\delta}_k)^2 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta_{\text{mod}(j+i-1,k)} \right)^2 - \left( \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \delta_j \right)^2. \quad (6)$$

Dla wzajemnie nieskorelowanych wszystkich wartości  $\delta_i$ ,  $\delta_j$  ( $i \neq j$ ) we wzorze (6) przy  $m \leq \text{round}(k/2) + 1$  wartość oczekiwana i odchylenie standardowe błędów wartości średniej współczynnika wzmocnienia wynoszą:

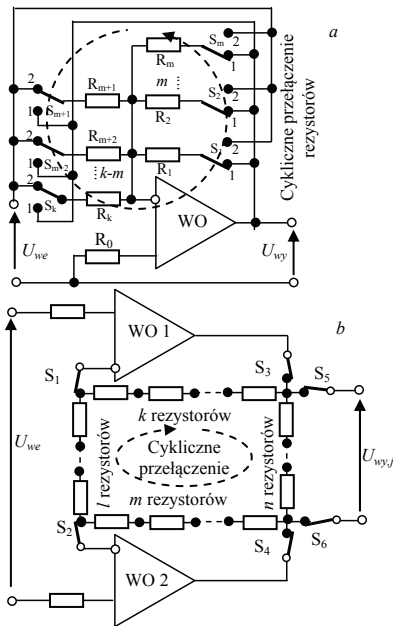
$$E[\delta_{K_{n, sr}}] = \sigma^2(\delta) \frac{k-m}{km}, \quad (7, a)$$

$$\sigma(\delta_{K_{n, sr}}) = \frac{\sigma^2(\delta) k-m}{\sqrt{k} km} \sqrt{\varepsilon + Q_n(k, m)}, \quad (7, b)$$

$$\text{gdzie: } Q_n(k, m) = \frac{k^2(4-1/m)(m-2) + 6km(3-m) - 9m^2}{3(k-m)^2}.$$

W sprzężeniu zwrotnym **wzmacniacza odwracającego** (rys. 2, a) też wykorzystuje się  $k$  rezystorów: w obwodzie wejściowym  $k-m$  równolegle połączonych rezystorów oraz bezpośrednio w sprzężeniu zwrotnym  $m$  rezystorów. Analogicznie w celu zmniejszenia wpływu niedokładności rezystorów realizuje się ich cykliczne przełączanie o jeden i wyznaczanie wartości średniej współczynnika wzmocnienia. Nominalny współczynnik wzmocnienia jest inny:  $K_{o, nom} = -(k/m-1) = -K_{n, nom} + 1$ . Na podstawie zależności (7) bardzo prosto można otrzymać wzory na obliczenie wartości oczekiwanej i odchylenia standardowego względnego błędów wartości średniej współczynnika wzmocnienia:

$$E[\delta_{K_{o, sr}}] = \frac{\sigma^2(\delta_R)}{m}, \quad \sigma(\delta_{K_{o, sr}}) = \frac{\sigma^2(\delta)}{m\sqrt{k}} \sqrt{\varepsilon + Q_n(k, m)}. \quad (8)$$



Rys. 2. Odwracający (a) oraz różnicowy (b) wzmacniacze z rezystancyjnym dynamicznym sprzężeniem zwrotnym [1]

Fig. 2. Inverting (a) and differential (b) amplifier with resistor dynamic-feedback [1]

Sprzężenie zwrotne **wzmacniacza różnicowego** zaproponowanego w [1] (rys. 2, b) wykonano w postaci zamkniętego obwodu z szeregowego połączenia  $N = k + m + n + l$  ( $N \geq 4$ ,  $m \geq 1$ ,  $l \geq 1$ ,  $n \geq 1$ ) rezystorów o jednakowej nominalnej rezystancji. W takim układzie do podłączenia tego obwodu wykorzystuje się 6 multiplexerów o  $N$  wejściach każdy (na rys. 2, b pokazano tylko po jednym kluczu  $S_1 - S_6$  każdego multiplexera). Stąd do podłączenia i cyklicznego przełączania rezystorów wykorzystuje się co najmniej  $6N$  kluczy. Jest to zbyt duża wartość, przykładowo dla  $N = 20$  rezystorów należy wykorzystać 120 kluczy. Jednak, ponieważ klucze, za pomocą których obwód rezystancyjny podłączony jest do wzmacniaczy operacyjnych, znajdują się poza obwodem rezystancyjnym (podłączenie sprzężenia zwrotnego w układzie czteroprzewodowym), można przyjąć, że wartości rezystancji tych kluczy praktycznie nie wpływają na wartość współ-

czynnika wzmocnienia. Nominalny współczynnik wzmocnienia zależy tylko od liczby rezystorów w gałęziach obwodu [1]:  $K_{r, nom} = (N-n)/l$ .

W rezultacie cyklicznego przełączania rezystorów sprzężenia zwrotnego i następnego uśredniania wartości napięć wyjściowych zależność względnego błędów wartości średniej współczynnika wzmocnienia ma postać:

$$\delta_{K_{r, sr}} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \overline{\delta_{l,i}^2} - \frac{N}{N-n} \overline{\delta_N^2} + \frac{n}{N-n} \overline{\delta_{l,i}} \cdot \overline{\delta_{n,i}} \right], \quad (9)$$

gdzie:

$$\overline{\delta_N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i; \quad \overline{\delta_{l,i}} = \frac{1}{l} \sum_{j=k+1}^{k+l} \delta_{\text{mod}(j+i-1, N)};$$

$$\overline{\delta_{n,i}} = \frac{1}{n} \sum_{j=N-n+1}^N \delta_{\text{mod}(j+i-1, N)}$$

są wartościami średnimi względnych odchyłek rezystancji rezystorów w odpowiednich gałęziach obwodu. Wartość oczekiwana i odchylenie standardowe względnego błędów (9) wartości średniej współczynnika wzmocnienia są równe:

$$E[\delta_{K_{r, sr}}] = \sigma^2(\delta) \frac{N-l-n}{(N-n)l}, \quad (10, a)$$

$$\sigma(\delta_{K_{r, sr}}) = \frac{\sigma^2(\delta)}{\sqrt{N}} \frac{N-l-n}{(N-n)l} \sqrt{\varepsilon + \frac{Q_l(N, n, l)}{(N-n)^2 l^2}}, \quad (10, b)$$

gdzie:

$$Q_l(N, n, l) = \frac{(N-n)^2}{3l} (4l^2 - 9l + 2) - l^2(2N+3) + 2l(3N-2n) + 4C(l, n);$$

$$C(n, l) = \frac{\min(n, l) + 1}{6} [2(\min(n, l) + 1)^2 - 3(\min(n, l) + 1)(n + l + 1) + 6nl + 3(n + l) + 1] - nl$$

### 3. Analiza wpływu rozrzutu rezystancji kluczy

W celu zapewnienia wystarczającej szybkości przełączeń rezystorów sprzężenia zwrotnego wykorzystywane są klucze elektroniczne. Problem wpływu kluczy na dokładność metody dynamicznego wzmocnienia związany jest z rozrzutem wartości rezystancji kluczy, to jest z niezerową różnicą  $\Delta r_{s,i} = r_{s2,i} - r_{s1,i} = R_{nom}(\delta_{s2,i} - \delta_{s1,i}) = R_{nom} \Delta \delta_{s,i}$  ich rezystancji  $r_{s1,i}$  (klucz  $S_i$  jest w pozycji 1) oraz rezystancji  $r_{s2,i}$  (klucz  $S_i$  jest w pozycji 2), gdzie  $\delta_{s1,i} = r_{s1,i}/R_{nom}$ ,  $\delta_{s2,i} = r_{s2,i}/R_{nom}$ ,  $\Delta \delta_{s,i} = \Delta r_{s,i}/R_{nom}$  są odpowiednio względnymi wartościami rezystancji i różnicy rezystancji kluczy. Ponieważ  $r_{s1,i} = r_{s2,i} - R_{nom} \Delta \delta_{s,i}$  lub inaczej  $\delta_{s1,i} = \delta_{s2,i} - \Delta \delta_{s,i}$ , dlatego dla maksymalnej wartości współczynnika wzmocnienia wzmacniacza nieodwracającego ( $m = 1$ ) wartość jego błędów względnego może być przedstawiona w postaci:

$$\delta_{K_{sr}} \approx \frac{k-1}{k} \left[ \frac{1}{k(k-1)} \sum_{i=1, j \neq i}^k (\delta_i + \delta_{s,i,2} - \delta_j - \delta_{s,j,2})^2 + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta \delta_{s,i} \right]. \quad (11)$$

Jeśli wszystkie klucze wykonane są w tej samej technologii (wartość oczekiwana względnych wartości rezystancji kluczy  $E(\delta_s)$ , wariancja  $\sigma^2(\delta_s)$ ), wtedy wartość oczekiwana i standardowe odchylenie błędów wartości średniej współczynnika wzmocnienia są równe:

$$E[\delta_{k_{sr}}] = \frac{k-1}{k}(\sigma^2(\delta) + \sigma^2(\delta_s)), \quad (12,a)$$

$$\sigma(\delta_{k_{sr}}) \approx \frac{k-1}{k} \frac{\sigma^2(\delta)}{\sqrt{k}} \sqrt{\varepsilon + Q(k,1) + 2 \frac{\sigma^2(\delta_s)}{\sigma^4(\delta)}}, \quad (12,b)$$

Ze wzoru (12, b) wynika, że w celu zapewnienia małej wartości odchylenia standardowego błędu współczynnika wzmocnienia ma być spełniony warunek dla odchylenia standardowego  $\sigma(r_s)$  rozrzutu rezystancji kluczy  $r_s$ :

$$\sigma(r_s) = \frac{\sigma(\delta_s)}{R_{nom}} \leq \frac{\sigma^2(\delta)}{2 \div 3} \sqrt{\frac{Q(k,1) + \varepsilon}{2}} \approx \frac{\sigma^2(\delta)}{2 \div 3} \sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}. \quad (13)$$

W (13) uwzględniono, że przy  $k > 3$  wartość  $Q(k,1) = (k-3)/(k-1) < 1$ . Przykładowo, jeśli wzmacniacz zbudowany jest z rezystorów o standardowym odchyleniu  $\sigma(\delta) = 0,01$  (1%) (jednostajny rozkład), wtedy standardowe odchylenie rozrzutu rezystancji kluczy powinno mieć rząd  $\approx 0,5 \cdot 10^{-4} R_{nom} = 0,005\% \cdot R_{nom}$ , to jest dla  $R_{nom} = 200 \text{ k}\Omega$   $\sigma(r_s) \approx 10 \Omega$ . Jednak dla rezystorów o względnym standardowym odchyleniu rezystancji  $\sigma(\delta) = 0,1\%$  wartość standardowego odchylenia rozrzutu rezystancji kluczy ma być w 100 razy mniejsza:  $\sigma(r_s) \approx 0,1 \Omega$ , co może być pewnym problemem.

#### 4. Wyniki badań i podsumowanie

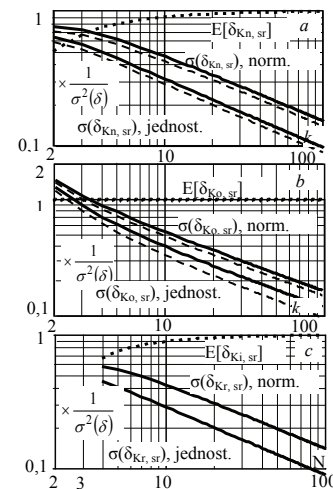
Na podstawie otrzymanych wyżej wzorów (7), (8), (10) oraz (12) zostały obliczone zależności wartości oczekiwanych i odchyłeń standardowych względnego błędu wartości współczynnika wzmocnienia i odchyłeń standardowych względnego błędu współczynnika wzmocnienia (bez uwzględnienia oraz z uwzględnieniem wpływu rezystancji kluczy) trzech rodzajów wzmacniaczy w funkcji liczby rezystorów ( $k = 2, \dots, 100$  oraz  $N = 4, \dots, 100$ ) dla jednostajnego i normalnego rozkładów prawdopodobieństwa rezystancji rezystorów. Przy obliczeniach przyjęto warunek uzyskania maksymalnej wartości współczynnika wzmocnienia przy minimalnej liczbie rezystorów, to jest przy  $m = 1$  oraz  $n = 1$ ,  $l = 1$ . We wzorze (12,b) przyjęto wartość stosunku  $\sigma(\delta_s)/\sigma^2(\delta) = 0,5$ . Obliczone zależności zostały unormowane względem wartości  $\sigma^2(\delta)$  i podane są na rys. 3,a,b,c.

Dodatkowo metodą Monte Carlo zbadano wpływ odchyłeń rezystancji rezystorów od wartości nominalnej oraz wpływ rezystancji kluczy na parametry błędu współczynnika wzmocnienia wzmacniacza nieodwracającego i odwracającego. Rezultaty badań różniły się od wartości obliczonych analitycznie poniżej 1 - 2 %.

Z analizy wzorów (7), (8), (10), (12) oraz przedstawionych na rys. 3 wykresów wynikają poniższe wnioski:

- 1) Teoretycznie, bez uwzględnienia wariancji rezystancji kluczy, wartości oczekiwane i standardowe odchylenia względnego błędu współczynnika wzmocnienia są proporcjonalne do kwadratu względnego odchylenia standardowego  $\sigma^2(\delta)$  rezystancji rezystorów sprzężenia zwrotnego, więc są one wartościami małymi drugiego rzędu. Względny błąd wartości średniej współczynnika wzmocnienia charakteryzuje się obciążeniem i praktycznie nie zależy od liczby rezystorów.
- 2) Odchylenia standardowe względnego błędu współczynnika wzmocnienia wszystkich wzmacniaczy zmniejszają się proporcjonalnie do pierwiastka z liczby rezystorów, dlatego zmniejszają się ze wzrostem współczynnika wzmocnienia. Oprócz tego, odchylenie standardowe jest w przybliżeniu  $\sqrt{1,4}$  razy większe w przypadku rozkładu normalnego rezystancji rezystorów niż w przypadku rozkładu jednostajnego.

- 3) W układach wzmacniaczy z dynamicznym sprzężeniem zwrotnym należy wykorzystywać klucze ze standardowym odchyleniem rozrzutu rezystancji, spełniającym warunek  $\sigma(\delta_s)/\sigma^2(\delta) \approx 0,5 \sqrt{\varepsilon/2}$ , dla którego zwiększenie błędu wynosi od  $\approx 10\%$  przy  $k = 2$  oraz  $\approx 25\%$  przy  $k = 100$ . Ten warunek można zapewnić doбором odpowiedniej wartości nominalnej rezystancji ( $R_{nom}$ ) rezystorów.
- 4) Jeśli w sprzężeniu zwrotnym wykorzystano rezystory o odchyleniu standardowym rezystancji  $\sigma(\delta) = 0,1\%$  teoretyczna wartość niepewności wartości średniej współczynników wzmocnienia nie przekroczy rzędu  $1,2 \div 3 \text{ ppm}$ .



Rys. 3. Zależności wartości oczekiwanych i odchyłeń standardowych względnego błędu wartości średniej współczynnika wzmocnienia wzmacniaczy: nieodwracającego (a), odwracającego (b) oraz różnicowego (c); linia ciągła – dla kluczy  $\sigma(\delta_s)/\sigma^2(\delta) = 0,5$ , linia kreskowana – dla kluczy idealnych ( $\sigma(\delta_s)/\sigma^2(\delta) = 0$ )

Fig. 3. The dependencies of the mean values and standard deviations of the amplification factor relative errors of amplifiers: non-inverting (a), inverting (b) and differential (c); solid line – switches  $\sigma(\delta_s)/\sigma^2(\delta) = 0,5$ , dashed line – ideal switches ( $\sigma(\delta_s)/\sigma^2(\delta) = 0$ )

#### 5. Literatura

- [1] Smart sensor systems. Edited by Gerard C. M. Mejer. John Wiley and Sons Ltd. 2008. 385 p.
- [2] Dorzhovets 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Dorzhovets M.: Analiza dokładności wzmacniaczy z rezystancyjnym dynamicznym sprzężeniem zwrotnym. IX Konferencja Naukowo-Techniczna: Podstawowe Problemy Metrologii. Krynica-Zdrój, 03 - 06 czerwca 2012. s. 96-102.

otrzymano / received: 18.09.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.11.2012

artykuł recenzowany / revised paper