ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1991

Seria: INFORMATYKA z. 15 Nr kol. 1044

Wojciech MIELCZAREK

Instytut Informatyki
Politechniki Śląskiej
w Gliwicach

OBLICZANIE ODPORNOŚCI NA ZAKŁÓCENIA WSPÓLNE DWUSTOPNIOWYCH WZMACNIACZY POMIAROWYCH ZBUDOWANYCH ZE WZMACNIACZY OPERACYJNYCH

Streszczenie. W artykule określono odporność na zakłócenia wspólne dwustopniowych wzmacniaczy pomiarowych zbudowanych ze wzmacniaczy operacyjnych poprzez obliczenie współczynnika CMRR. Uwzględniono przy tym wzmocnienie różnicowe oraz współczynnik CMRR wzmacniaczy operacyjnych, jak również niezrównoważenie rezystorów ustalających wzmocnienie układu. Jeden z rozpatrywanych wzmacniaczy stanowi rozwiązanie oryginalne, powstałe poprzez objęcie stopnia wejściowego wzmacniacza pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego dla napięcia wspólnego. Takie sprzężenie widocznie poprawia współczynnik CMRR układu. Analizowane wzmacniacze potraktowano jako kaskadowe połączenie dwóch symetrycznych, nie obciążających się układów pomiarowych, co znacznie ułatwia obliczenia.

1. Wprowadzenie

Wzmacniacz pomiarowy jest specjalizowanym wzmacniaczem różnicowym o zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, przeznaczonym do dokładnego wzmacniania niskonapięciowych sygnałów pomiarowych w obecności zakłóceń wspólnych. Stosowany jest między innymi w systemach wejść analogowych komputerów w sytuacjach, gdy istotna jest duża dokładność wzmocnienia i duży współczynnik CMRR, jednak napięcia wspólne są ograniczone (nie powodują nasycania wzmacniacza), a źródło sygnału pomiarowego nie musi być galwanicznie izolowane od systemu pomiarowego.

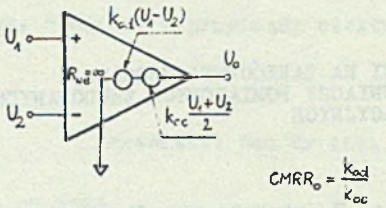
Ze względu na strukturę wzmacniacz pomiarowy traktować można jako układ o symetrycznym wejściu i niesymetrycznym wyjściu [1] . Dalej zajmiemy się określeniem transmitancji różnicowej K_d, wspólnej K_c oraz współczynnika CMRR dwustopniowych wzmacniaczy pomiarowych prądu stałego, zbudowanych ze wzmacniaczy operacyjnych oraz sieci rezystorów ustalających wzmocnienie układu. Interesujące nas parametry wzmacniaczy zależą od: struktury układu, parametrów zastosowanych wzmacniaczy operacyjnych, własności rezystorów, wzajemnego zrównoważenia odpowiadających sobie elementów w symetrycznej konfiguracji układu.

Rozpatrzymy dwa układy posiadające podobne struktury, jednak różną odporność na zakłócenia wspólne:

1. Układ z przedwzmacniaczem na wejściu i wzmacniaczem różnicowym o ustalonym wzmocnieniu na wyjściu.

2. Układ z przedwzmacniaczem objętym sprzężeniem zwrotnym dla napięcia wspólnego na wejściu i wzmacniaczem różnicowym o ustalonym wzmocnieniu na wyjściu.

Przyjmiemy przy tym przedstawiony na rys. 1 schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego.



Rys. 1. Schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego przyjęty przy określaniu parametrów wzmacniaczy pomiarowych

k_{od} - wzmocnienie różnicowe

k_{oc} - wzmocnienie wspólne

$CMRR_o$ - współczynnik tłumienia napięcia wspólnego

Fig. 1. Operational amplifier - model used to analyse instrumentation amplifiers parameters

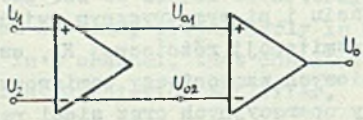
k_{od} - differential gain

k_{oc} - common gain

$CMRR_o$ - Common Mode Rejection Ratio

2. Odporność na zakłócenia wspólne dwustopniowych wzmacniaczy pomiarowych zbudowanych ze wzmacniaczy operacyjnych

Wymienione w punkcie 1 wzmacniacze rozpatrywać będziemy jako kaskadowe połączenie dwóch symetrycznych układów pomiarowych (rys. 2), a mianowicie układu o symetrycznym wejściu i wyjściu (stopień wejściowy) z układem o symetrycznym wejściu i niesymetrycznym wyjściu (stopień wyjściowy).



Rys. 2. Dwustopniowy wzmacniacz pomiarowy jako kaskadowe połączenie układu o symetrycznym wejściu i wyjściu z układem o symetrycznym wejściu i niesymetrycznym wyjściu

Fig. 2. Two stages instrumentation amplifier as cascade connection of a symmetrical input-output circuit and symmetrical input - nonsymmetrical output circuit

Założymy przy tym, że stopień drugi nie obciąża stopnia pierwszego, co pozwala rozpatrywać obie części oddzielnie, a potem skorzystać z przedstawionych w [1,2] wzorów opisujących całe połączenie na podstawie znajomości parametrów układów składowych. Założenie takie jest możliwe, jak się przekonamy, ponieważ rezystancja wyjściowa stopnia pierwszego jest w analizowanych przypadkach równa zero*).

Przy określaniu parametrów wyodrębnionych części wzmacniacza pomiarowego oraz parametrów reprezentujących cały wzmacniacz korzystać będziemy z równań przetwarzania w następującej postaci [1] :

a) równania przetwarzania stopnia pierwszego

$$U_{o1} - U_{o2} = K_{dd1}(U_1 - U_2) + K_{cd1}\frac{U_1 + U_2}{2}$$

$$\frac{U_{o1} + U_{o2}}{2} = K_{dc1}(U_1 - U_2) + K_{cc1}\frac{U_1 + U_2}{2}, \tag{1}$$

b) równanie przetwarzania stopnia wyjściowego

$$U_o = K_{d2}(U_{o1} - U_{o2}) + K_{c2}\frac{U_{o1} + U_{o2}}{2}, \tag{2}$$

c) równanie przetwarzania całego wzmacniacza

$$U_o = K_d(U_1 - U_2) + K_c\frac{U_1 + U_2}{2}, \tag{3}$$

przy czym napięcia $U_1, U_2, U_{o1}, U_{o2}, U_o$ jak na rys. 2.

Zależności wiążące parametry całego wzmacniacza z parametrami poszczególnych jego stopni są na podstawie [1,2] następujące:

$$K_{dd} = K_{dd1}K_{d2}, \tag{4}$$

$$K_c = K_{cc1}K_{c2} + K_{cd1}K_{d2}, \tag{5}$$

$$CMRR = \frac{1}{\frac{1}{CMRR_1} + \frac{K_{cc1}}{K_{dd1}}\frac{1}{CMRR_2}}, \tag{6}$$

*) Wynika to z faktu, że zaciski wyjściowe stopnia wejściowego są bezpośrednio połączone z wyjściem wzmacniaczy operacyjnych, które jak przyjęliśmy, posiadają zerową wartość rezystancji wyjściowej.

przy czym

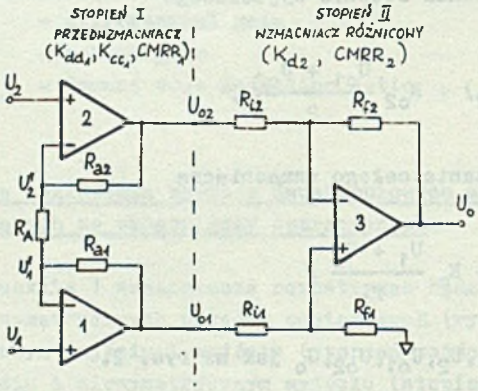
$$CMRR_1 = \frac{K_{dd1}}{K_{cd1}}, \tag{7}$$

$$CMRR_2 = \frac{K_{d2}}{K_{c2}}, \tag{8}$$

$$CMRR = \frac{K_d}{K_c}. \tag{9}$$

2.1. Wzmacniacz pomiarowy z przedwzmacniaczem na wejściu i wzmacniaczem różnicowym na wyjściu

Jednym z najczęściej stosowanych rozwiązań wzmacniacza pomiarowego jest układ składający się z trzech wzmacniaczy operacyjnych, z których dwa tworzą symetryczny przedwzmacniacz, a trzeci stanowi podstawowy element wyjściowego wzmacniacza różnicowego o ustalonym wzmocnieniu (rys. 3).



Rys. 3. Wzmacniacz pomiarowy z przedwzmacniaczem na wejściu i wzmacniaczem różnicowym na wyjściu

Fig. 3. Instrumentation amplifier with preamplifier and differential amplifier at the output

Na wstępie obliczymy parametry stopnia wejściowego wzmacniacza. Przedwzmacniacz opisują następujące równania:

$$U_{o1} = k_{od1}(U_1 - U_1') + k_{oc1}\frac{U_1 + U_1'}{2}, \tag{10}$$

$$U_{o2} = k_{od2}(U_2 - U_2') + k_{oc2}\frac{U_2 + U_2'}{2},$$

$$U_1 = \frac{R_{a2} + R_A}{R_{a1} + R_{a2} + R_A} U_{o1} + \frac{R_{a1}}{R_{a1} + R_{a2} + R_A} U_{o2}, \tag{10}$$

$$U_2 = \frac{R_{a1} + R_A}{R_{a1} + R_{a2} + R_A} U_{o2} + \frac{R_{a2}}{R_{a1} + R_{a2} + R_A} U_{o1}.$$

Po przekształceniu układu równań (10) do postaci reprezentowanej przez zależność 1 otrzymamy:

$$K_{dd1} = \frac{(R_{a1} + R_{a2} + R_A)(k_{o1}k_{o2}' + k_{o2}k_{o1}' + k_{o1} + k_{o2})}{2M}, \tag{11}$$

$$K_{cd1} = \frac{(R_{a1} + R_{a2} + R_A)(k_{o1}k_{o2}' - k_{o2}k_{o1}' + k_{o1} - k_{o2})}{M}, \tag{12}$$

$$K_{cc1} = \frac{(R_{a1}+R_{a2}+R_A)(k_{o1}+k_{o2}) + R_A(k_{o1}k_{o2}'+k_{o2}k_{o1}') + (R_{a1}-R_{a2})(k_{o1}k_{o2}'-k_{o2}k_{o1}')}{2M} \tag{13}$$

gdzie

$$M = k_{o1}'(R_{a2}+R_A) + k_{o2}'(R_{a1}+R_A) + k_{o1}'k_{o2}'R_A + R_{a1} + R_{a2} + R_A,$$

$$k_{o1} = k_{od1} + \frac{1}{2}k_{oc1},$$

$$k_{o1}' = k_{od1} - \frac{1}{2}k_{oc1}, \tag{14}$$

$$k_{o2}' = k_{od2} + \frac{1}{2}k_{oc2},$$

$$k_{o2}' = k_{od2} - \frac{1}{2}k_{oc2}.$$

Współczynnik $CMRR_1$ przedwzmacniacza będzie zatem równy:

$$CMRR_1 = \frac{1}{2}\,\frac{k_{o1}(1+k'_{o2}) + k_{o2}(1+k'_{o1})}{k_{o1}(1+k'_{o2}) - k_{o2}(1+k'_{o1})}\,. \tag{15}$$

Wzory (11), (13) i (15) można znacznie uprościć, jeżeli skorzysta się z prawdziwych dla wzmacniacza operacyjnego nierówności:

$$\begin{aligned} &k_{od1} \gg 1\,,\\ &k_{od2} \gg 1\,,\\ &k_{od1} \gg k_{oc1}\,,\\ &k_{od} \gg k_{oc2}\,, \end{aligned} \tag{16}$$

oraz uwzględni, że:

$$\begin{aligned} CMRR_{o1} &= \frac{k_{od1}}{k_{oc1}}\,,\\ CMRR_{o2} &= \frac{k_{od2}}{k_{oc2}}\,. \end{aligned} \tag{17}$$

W wyniku otrzymamy:

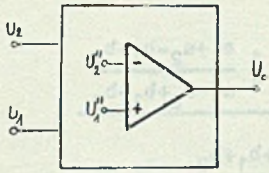
$$K_{dd1} \cong 1 + \frac{2R_a}{R_A} \qquad \text{(słuszne przy założeniu } R_{a1} = R_{a2} = R_a\text{)}, \tag{18}$$

$$K_{cc1} \cong 1\,, \tag{19}$$

$$CMRR_1 \cong \frac{1}{\dfrac{1}{CMRR_{o1}} - \dfrac{1}{CMRR_{o2}} + \dfrac{1}{k_{od2}} - \dfrac{1}{k_{od1}}}\,. \tag{20}$$

Obliczymy teraz współczynnik $CMRR_2$ stopnia wyjściowego, którym jest wzmacniacz różnicowy o ustalonym wzmocnieniu. Obliczenia przeprowadzimy na podstawie przedstawionego na (rys. 4) "modelu ogólnego", co pozwala wykorzystać

otrzymane rezultaty przy rozpatrywaniu innych wzmacniaczy różnicowych wykorzystujących jeden wzmacniacz operacyjny.



Rys. 4. Ogólny model wzmacniacza różnicowego z jednym wzmacniaczem operacyjnym. Wyjście wzmacniacza operacyjnego jest jednocześnie wyjściem całego układu

Fig. 4. Block diagram of the differential amplifier with one operational amplifier. Operational amplifier output is the output of instrumentation amplifier

Napięcia na wejściu wzmacniacza operacyjnego można opisać następującymi równaniami:

$$U_1'' = a_1U_1 + b_1U_2 + c_1U_o ,$$
$$U_2'' = a_2U_1 + b_2U_2 + c_2U_o , \tag{21}$$

przy czym a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2 są stałymi zależnymi od rezystancji ustalających wzmocnienie układu. Napięcie wyjściowe natomiast wyniesie:

$$U_o = k_{od}(U_1'' - U_2'') + k_{oc}\frac{U_1'' + U_2''}{2} , \tag{22}$$

gdzie k_{od} i k_{oc} są odpowiednio: wzmocnieniem różnicowym oraz wspólnym wzmacniacza operacyjnego.

Na podstawie równań (21) i (22), które przekształcić można do postaci reprezentowanej przez równanie (2), otrzymamy:

$$K_d = \frac{1}{2}\,\frac{k_{od}(a_1-a_2 + b_2-b_1) + \frac{1}{2}k_{oc}(a_1+_2 - b_1-b_2)}{1 + k_{od}(c_2-c_1) - \frac{1}{2}k_{oc}(c_1+c_2)} , \tag{23}$$

$$K_c = \frac{k_{od}(a_1-a_2 + b_1-b_2) + \frac{1}{2}k_{oc}(a_1+a_2 + b_1+b_2)}{1 + k_{od}(c_2-c_1) - \frac{1}{2}k_{oc}(c_1+c_2)} \tag{24}$$

oraz po uwzględnieniu $CMRR_o = \frac{k_{od}}{k_{oc}}$:

$$CMRR = \frac{CMRR_o \frac{1}{2} \frac{a_1-a_2+b_2-b_1}{a_1-a_2+b_1-b_2} - \frac{1}{4} \frac{a_1+a_2-b_1+b_2}{a_1-a_2+b_1-b_2}}{CMRR_o + \frac{1}{2} \frac{a_1+a_2+b_1+b_2}{a_1-a_2+b_1-b_2}} . \tag{25}$$

Zastanówmy się teraz, jakimi wzorami byłoby określone wzmocnienie różnicowe K_{du}, wspólne K_{cu} oraz współczynnik $CMRR_u$ wzmacniacza różnicowego, zawierającego idealny wzmacniacz operacyjny ($k_{od} = \infty$, $k_{oc} = 0$, $CMRR_o = \infty$). Na podstawie zależności (23), (24) i (25) dostaniemy:

$$K_{du} = \frac{a_1-a_2+b_2-b_1}{2(c_2-c_1)} , \tag{26}$$

$$K_{cu} = \frac{a_1-a_2+b_1-b_2}{c_2-c_1} , \tag{27}$$

$$CMRR_u = \frac{1}{2} \frac{a_1-a_2+b_2-b_1}{a_1-a_2+b_1-b_2} . \tag{28}$$

Tak obliczone parametry wzmacniacza różnicowego (wzory (26),(27),(28)) są przybliżeniem obejmującym jedynie cechy struktury i właściwości elementów ustalających wzmocnienie układu. Uwzględniając równanie (28) w równaniu (25) otrzymamy:

$$CMRR = \frac{CMRR_o CMRR_u + \frac{1}{4} \frac{a_1+a_2-b_1-b_2}{a_1-a_2+b_1-b_2}}{CMRR_o + CMRR_u + \frac{a_2+b_1}{a_1-a_2+b_1-b_2}} . \tag{29}$$

Wzmacniacz różnicowy stanowiący drugi stopień wzmacniacza pomiarowego pokazanego na rys. 3 opisują równania:

$$U_1'' = \frac{R_{f1}}{R_{i1} + R_{f1}} U_{o1} ,$$

$$\frac{U_2 - U_2''}{R_{i2}} = \frac{U_2'' - U_o}{R_{f2}} , \tag{30}$$

$$U_o = k_{od3}(U_1'' - U_2'') + k_{oc3} \frac{U_1'' + U_2''}{2} .$$

z których po przekształceniu do postaci reprezentowanej przez równanie (21) otrzymamy:

$$a_1 = \frac{R_{f1}}{R_{i1} + R_{f1}} , \qquad b_1 = 0, \quad c_1 = 0,$$

$$a_2 = 0, \quad b_2 = \frac{R_{f2}}{R_{i2} + R_{f2}} , \quad c_2 = \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_{f2}} . \tag{31}$$

Na podstawie równań (23),(24),(29) oraz zależności (31) można wykazać, że:

$$K_{d2} = \frac{R_{i2} + R_{f2}}{2R_{i2}} \left(\frac{R_{f1}}{R_{i1} + R_{f1}} \frac{k_{o3}}{k_{o3}'} + \frac{R_{f2}}{R_{i2} + R_{f2}}\right) , \tag{32}$$

$$K_{c2} = \frac{R_{i2} + R_{f2}}{R_{i2}} \left(\frac{R_{f1}}{R_{i1} + R_{f1}} \frac{k_{o3}}{k_{o3}'} - \frac{R_{f2}}{R_{i2} + R_{f2}}\right) , \tag{33}$$

$$CMRR_2 = \frac{CMRR_o CMRR_u}{CMRR_o + CMRR_u} , \tag{34}$$

gdzie

$$k_{o3} = k_{od3} + \frac{1}{2} k_{oc3} ,$$

$$k_{o3}' = k_{od3} - \frac{1}{2} k_{oc3} . \tag{35}$$

W przypadku idealnego wzmacniacza operacyjnego powyższe wzory można uprościć do postaci:

$$K_{du} = \frac{R_{i2} + R_{f2}}{2R_{i2}} \left(\frac{R_{f1}}{R_{i1} + R_{f1}} + \frac{R_{f2}}{R_{i2} + R_{f2}}\right), \tag{36}$$

$$K_{cu} = \frac{R_{i2} + R_{f2}}{R_{i2}} \left(\frac{R_{f1}}{R_{i1} + R_{f1}} - \frac{R_{f2}}{R_{i2} + R_{f2}}\right), \tag{37}$$

$$CMRR_u = \frac{R_{f1}(R_{i2} + R_{f2}) + R_{f2}(R_{i1} + R_{f1})}{2(R_{i2}R_{f1} - R_{i1}R_{f2})}. \tag{38}$$

Rozważmy teraz, od czego zależy współczynnik $CMRR_u$. Odwołując się do wzoru (38) można spostrzec, że maksymalną (równą nieskończoności) wartość tego współczynnika otrzymamy, gdy

$$\frac{R_{i1}}{R_{f1}} = \frac{R_{i2}}{R_{f2}}. \tag{39}$$

Powyższy warunek można spełnić wybierając na przykład $R_{i1}=R_{i2}$, $R_{f1}=R_{f2}$. W praktyce można jednak to zrealizować jedynie z określoną dokładnością, która zależy od tolerancji zastosowanych rezystorów. Spróbujmy zatem przedstawić jak tolerancja γ rezystorów wpływa na współczynnik $CMRR_u$. Oznaczmy przez R_{iN} wartość nominalną rezystorów R_{i1}, R_{i2} oraz przez R_{fN} wartość nominalną rezystorów R_{f1}, R_{f2}. Ponadto przyjmijmy, że wszystkie rezystory mają identyczną tolerancję.

Najgorszy przypadek (najmniejsza przy danej tolerancji wartość $CMRR_u$) zajdzie, jeżeli:

$$\begin{aligned} R_{i1} &= R_{iN}(1 - \gamma), \\ R_{i2} &= R_{iN}(1 + \gamma), \\ R_{f1} &= R_{fN}(1 + \gamma), \\ R_{f2} &= R_{fN}(1 - \gamma). \end{aligned} \tag{40}$$

Po podstawieniu zależności (40) do równania (38) otrzymamy następujący wzór przybliżony:

$$CMRR_u = (1 + \frac{R_{fN}}{R_{iN}}) \frac{1}{4\gamma} . \tag{41}$$

Ponieważ wzmocnienie układu jest w rozważanym przypadku (spełniony warunek (39)) w przybliżeniu równe:

$$K_{d2} = K_{dv} = \frac{R_{fN}}{R_{iN}} , \tag{42}$$

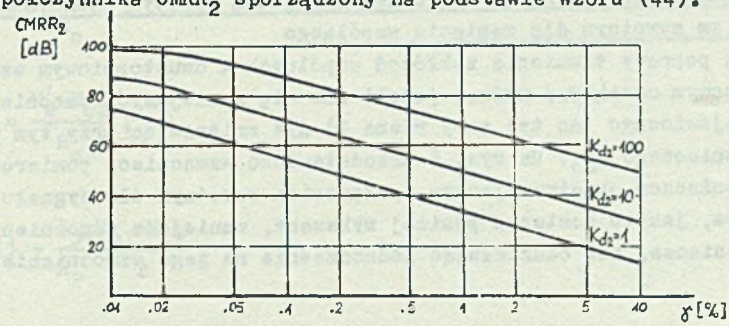
ostatecznie można napisać:

$$CMRR_u = (1 + K_{d2}) \frac{1}{4\gamma} . \tag{43}$$

Podstawiając tak określony współczynnik $CMRR_u$ do równania (34) otrzymamy:

$$CMRR_2 = \frac{CMRR_{o3}(1 + K_{d2}) \frac{1}{4\gamma}}{CMRR_{o3} + (1 + K_{d2}) \frac{1}{4\gamma}} . \tag{44}$$

Wartość współczynnika $CMRR_2$ wzmacniacza różnicowego istotnie zależy więc od wzmocnienia K_{d2}, tolerancji rezystorów oraz jest ograniczona wartością współczynnika $CMRR_{o3}$ wzmacniacza operacyjnego. Na rys. 5 przedstawiono wykres współczynnika $CMRR_2$ sporządzony na podstawie wzoru (44).



Rys. 5. Zależność współczynnika CMRR wzmacniacza różnicowego od tolerancji rezystorów - wyniki obliczeń

Fig. 5. Relationship between CMRR of differential amplifier and resistors unbalance - calculation results

W tablicy 1 zestawiono wyniki obliczeń i wyniki pomiarów współczynnika CMRR wzmacniacza pomiarowego pokazanego na rys. 4. Obliczenia przeprowadzono opierając się na wzorze (6), przy wykorzystaniu równań (18),(19), (20) oraz (44). W równaniu (44) przyjęto $K_{d2}=1$.

Tablica 1

Wyniki obliczeń i wyniki pomiarów współczynnika CMRR dwustopniowego wzmacniacza pomiarowego ze wzmocnieniem regulowanym w stopniu wejściowym. $K_d=K_{dd1}$, $K_{d2}=1$, $\gamma=0.1\%$, $CMRR_{o1}=94.5dB$, $k_{od1}=53323$, $CMRR_{o2}=113dB$, $k_{o2}=75791$, $CMRR_{o3}=102dB$, $k_{o3}=180700$. Napięcie wspólne stałe równe 10V

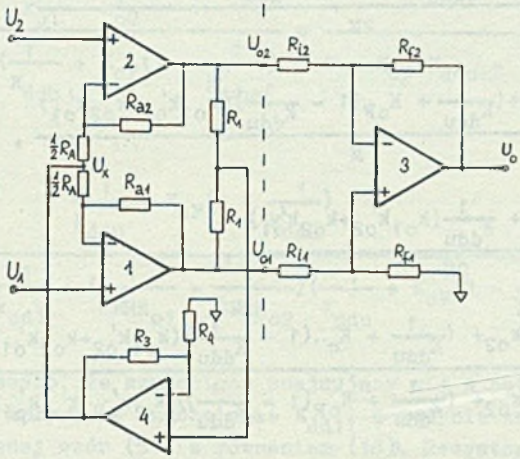
	CMRR [dB] obliczone	CMRR [dB] zmierzone
$K_d=1$	53.9	53.7
$K_d=10$	73.5	74.2
$K_d=100$	90.1	91.1

Zastanówmy się jeszcze nad zagadnieniem "podziału" wzmocnienia na poszczególne stopnie wzmacniacza pomiarowego. W rozważanych przykładach przyjmowaliśmy $K_d=K_{dd1}$, $K_{d2}=1$, co oznacza, że sygnał pomiarowy wzmacniany był jedynie w stopniu wejściowym. Uzasadnienie dla takiego postępowania można znaleźć we wzorze (6), z którego widać, że korzystne jest wzmacnianie właśnie w przedwzmacniaczu, ponieważ powoduje wzrost współczynnika CMRR[xx]. Potwierdzenie tego spostrzeżenia można znaleźć w [2] , gdzie rozważany jest wzmacniacz pomiarowy z buforem wejściowym o wzmocnieniu równym 1 i wzmacniaczem różnicowym o regulowanym wzmocnieniu na wyjściu.

2.2. Wzmacniacz pomiarowy z przedwzmacniaczem objętym ujemnym sprzężeniem zwrotnym dla napięcia wspólnego

Dalszej poprawy tłumienia zakłóceń wspólnych w dwustopniowym wzmacniaczu pomiarowym oczekiwać można, jeżeli uda się zmniejszyć wzmocnienie K_{cc} stopnia wejściowego (do tej pory równe 1) nie zmieniając przy tym wzmocnienia różnicowego K_{dd}. Na rys. 6 przedstawiono wzmacniacz pomiarowy z przedwzmacniaczem objętym ujemnym sprzężeniem zwrotnym dla sygnału wspólnego, które, jak to zostanie poniżej wykazane, zmniejsza wzmocnienie K_{cc} przedwzmacniacza, nie oddziałując jednocześnie na jego wzmocnienie różnicowe.

[xx] Wynika to z oczywistej konieczności niedopuszczenia do wzmacniania błędu związanego z oddziaływaniem napięć wspólnych w stopniu wejściowym.



Rys. 6. Wzmacniacz pomiarowy z przedwzmacniaczem objętym ujemnym sprzężeniem zwrotnym dla napięcia wspólnego

Fig. 6. Instrumentation amplifier using preamplifier with negative common voltage feedback

Z przedstawionym układem przedwzmacniacza związane są następujące równania:

$$U_{o1} = k_{o1}U_1 - k'_{o1}U'_1 ,$$

$$U_{o2} = k_{o2}U_2 - k'_{o2}U'_2 ,$$

$$\frac{U_x - U'_1}{0.5R_A} = \frac{U'_1 - U_{o1}}{R_a} , \qquad (45)$$

$$\frac{U_x - U'_2}{0.5R_A} = \frac{U'_2 - U_{o2}}{R_a} ,$$

$$U_x = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right)\frac{U_{o1} + U_{o2}}{2} ,$$

przy czym $k_{o1}, k'_{o1}, k_{o2}, k'_{o2}$ określone są zależnościami (14).
Układ równań (45) można przekształcić do postaci reprezentowanej przez równanie (1), otrzymując:

$$K_{dd1} = \frac{k_{o1}+k_{o2}+(\frac{1}{K_{ddu}} + K_{cF}(1 - \frac{1}{K_{ddu}})(k_{o1}k'_{o2}+k_{o2}k'_{o1})}{2M}, \tag{46}$$

$$K_{cd1} = \frac{k_{o1}-k_{o2}+(\frac{1}{K_{ddu}} + K_{cF}(1 - \frac{1}{K_{ddu}})(k_{o1}k'_{o2}-k_{o2}k'_{o1})}{M}, \tag{47}$$

$$K_{cc1} = \frac{k_{o1}+k_{o2}+ \frac{1}{K_{ddu}}(k_{o1}k'_{o2}+k_{o2}k'_{o1})}{2M}, \tag{48}$$

$$CMRR_1 = \frac{1}{2}\,\frac{k_{o1}+k_{o2}+ (\frac{1}{K_{ddu}} + K_{cF}(1 - \frac{1}{K_{ddu}}))(k_{o1}k'_{o2}+k_{o2}k'_{o1})}{k_{o1}-k_{o2}+ (\frac{1}{K_{ddu}} + K_{cF}(1 - \frac{1}{K_{ddu}}))(k_{o1}k'_{o2}-k_{o2}k'_{o1})}, \tag{49}$$

gdzie

$$M = 1+(\frac{1}{K_{ddu}} + \frac{1}{2}K_{cF}(1- \frac{1}{K_{ddu}}))(k'_{o1}+k'_{o2}) + k'_{o1}k'_{o2}\,\frac{1}{K_{ddu}}\,(\frac{1}{K_{ddu}} + K_{cF}(1- \frac{1}{K_{ddu}}))$$

$$K_{cF} = 1 + \frac{R_3}{R_2}, \qquad K_{ddu} = 1 + \frac{2R_a}{R_A}. \tag{50}$$

Jeżeli wykorzystamy nierówności (16) oraz zależności (17), to przedstawione powyżej związki można znacznie uprościć:

$$K_{dd1} \cong \frac{1}{2}\,\frac{\frac{k_{o1}}{k'_{o1}} + \frac{k_{o2}}{k'_{o2}}}{\frac{1}{K_{ddu}}} \cong K_{ddu}, \tag{51}$$

$$K_{cc1} \cong \frac{1}{2}\,\frac{\dfrac{k_{o1}}{k'_{o1}} + \dfrac{k_{o2}}{k'_{o2}}}{\dfrac{1}{K_{ddu}}\left(\dfrac{1}{K_{ddu}} + K_{cF}\left(1 - \dfrac{1}{K_{ddu}}\right)\right)} = \frac{K_{ddu}}{1 + K_{cF}(K_{ddu} - 1)}, \tag{52}$$

$$CMRR_1 \cong \frac{\dfrac{1}{K_{ddu}} + K_{cF}\left(1 - \dfrac{1}{K_{ddu}}\right)}{\dfrac{1}{k_{od2}} - \dfrac{1}{k_{od1}} + \left(\dfrac{1}{CMRR_{o1}} - \dfrac{1}{CMRR_{o2}}\right)\left(\dfrac{1}{K_{ddu}} + K_{cF}\left(1 - \dfrac{1}{K_{ddu}}\right)\right)}. \tag{53}$$

W ten sposób wykazano, że wzmacniacz znajdujący się w pętli sprzężenia zwrotnego nie ma wpływu na wzmocnienie K_{dd1}, a jedynie zmniejsza wzmocnienie K_{cc} (porównaj wzór (51) z równaniem (18)). Rezystory ustalające wzmocnienie w pętli sprzężenia zwrotnego należy wybrać tak, aby

$$\frac{R_3R_2}{R_3+R_2} = 0.5R_1,$$

(zatem na przykład $R_3 = 0.5R_1K_{cF}$, $R_2 = \dfrac{R_3}{K_{cF}-1}$)[xxx].

Obecność sprzężenia zwrotnego ma jednak pewien, jakkolwiek niewielki, wpływ na współczynnik $CMRR_1$ przedwzmacniacza.

W tablicy 2 zestawiono wyniki obliczeń (na podstawie wzoru (6) przy wykorzystaniu równań (44),(51),(52),(53)) i wyniki pomiarów współczynnika CMRR wzmacniacza pomiarowego, w którym stopień wejściowy objęto ujemnym sprzężeniem zwrotnym dla sygnału wspólnego.

[xxx] Taki warunek podyktowany jest koniecznością ograniczenia wpływu wejściowych prądów polaryzacji wzmacniacza operacyjnego.

Tablica 2

Wyniki obliczeń i wyniki pomiarów współczynnika CMRR wzmacniacza pomiarowego z ujemnym sprzężeniem zwrotnym dla napięcia wspólnego w stopniu wejściowym. $K_d = K_{dd1}$, $K_{d2} = 1$, $\gamma = 0.1\%$, $CMRR_{o1} = 94.5dB$, $k_{od1} = 53323$, $CMRR_{o2} = 113dB$ $k_{o2} = 75791$, $CMRR_{o3} = 102dB$, $k_{o3} = 180700$. Napięcie wspólne stałe równe 10V

	$K_d = 10$		$k_d = 100$	
	CMRR [dB] obliczone	CMRR [dB] zmierzone	CMRR [dB] obliczone	CMRR [dB] zmierzone
$K_{cF} = 2$	78.5	78.3	92.5	92.1
$K_{cF} = 5$	84.6	84.9	94.2	94.4
$K_{cF} = 10$	88.4	88.8	94.9	94.7

3. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych obliczeń i wyników pomiarów można stwierdzić, że:

1. Do obliczenia współczynnika CMRR dwustopniowych wzmacniaczy pomiarowych wygodnie jest skorzystać z równania (6), określającego odporność na zakłócenia wspólne kaskadowego połączenia dwóch symetrycznych układów pomiarowych.

2. O tłumieniu napięć wspólnych w rozpatrywanych wzmacniaczach pomiarowych decydują przede wszystkim:

- wartości parametrów zastosowanych wzmacniaczy operacyjnych,
- zrównoważenie odpowiadających sobie elementów w symetrycznej strukturze wzmacniacza (wzmacniaczy operacyjnych w przedwzmacniaczu i rezystorów we wzmacniaczu różnicowym).

3. Dla osiągnięcia bardzo dobrego tłumienia zakłóceń wspólnych, oprócz starannego zrównoważenia układu (co jest nadzwyczaj trudne) oraz zapewnienia dużych wartości wzmocnienia i współczynnika CMRR wzmacniaczy operacyjnych, trzeba jeszcze ograniczać wzmocnienie K_{co} przedwzmacniacza oraz ustalać dużą wartość jego wzmocnienia różnicowego K_{dd}. To drugie wymaganie zależy od wartości sygnału pomiarowego i zakresu napięć wejściowych urządzeń znajdujących się na wyjściu wzmacniacza pomiarowego (np. konwerter A/C).

4. Obliczenia przeprowadzone na podstawie zależności przedstawionych w artykule są przybliżone. W rzeczywistości współczynnik CMRR wzmacniacza pomiarowego zależy również od napięcia wspólnego i jest on nieliniową funkcją tego napięcia. Jest to szczególnie widoczne dla wzmacniaczy wykorzystujących wzmacniacze operacyjne z wejściem FET.

LITERATURA

[1] W. MIELCZAREK: "Obliczanie współczynnika CMRR złożonych symetrycznych układów pomiarowych", Zeszyty Naukowe Pol.Śl., z.

[2] W. MIELCZAREK: "Wyznaczanie tłumienia zakłóceń wspólnych w układach wejściowych cyfrowych systemów pomiarowych", praca doktorska, Pol. Śl., 1984.

[3] M. SMITHER: "CMRR Analisis of the 3 Op.-amp. Instrumentation Amplifier", Electronic Letters, No.20, 1977.

[4] J. SZYNOWSKI: "CMRR Analisis of Instrumentation Amplifiers", Electronica Letters, Vol.19, No.14, 1983.

Recenzent: Doc.dr inż. Maria Jastrzębska

Wpłynęło do Redakcji 01.08.1986.

РАСЧЕТ СТОЙКОСТИ НА ОБЩИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ДВУКАДНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПОСТРОЕННЫХ ИЗ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Р е з ю м е

В статье дано определение стойкости на общие возмущения двукаскадных измерительных усилителей построенных из операционных усилителей путем расчета коэффициента CMRR . Учтено при этом дифференциальное усиление а также коэффициент CMRR операционных усилителей и неравновесие резисторов определяющих усиление системы. Один из рассматриваемых усилителей является новым по конструкции, построенный путем охвата отрицательной обратной связью общего напряжения. Такая связь значительно улучшает коэффициент системы. Анализированные усилители трактуются как каскадное соединение двух симметричных независимых измерительных систем, что в значительной мере упрощает расчеты.

CMRR ANALYSIS OF TWO STAGES INSTRUMENTATION AMPLIFIERS CONSISTING OF OPERATIONAL AMPLIFIERS

S u m m a r y

This paper presents the calculation of Common Mode Rejection Ratio of instrumentation amplifiers basing on traditional 3-operational amplifiers configuration. Instrumentation amplifier is treated as connection of two symmetrical stages and the rules, that describe such connection, are applied. One of the amplifiers under consideration presents an idea how to improve common mode noise rejection using negative feedback loop for common mode voltages.