

Jan SZYNOWSKI

Politechnika Śląska

STROJENIE WYBRANYCH PARAMETRÓW OKREŚLAJĄCYCH WIELKOŚĆ NAPIĘCIA
NIEZRÓWNOWAŻENIA WE WZMACNIACZACH POMIAROWYCH

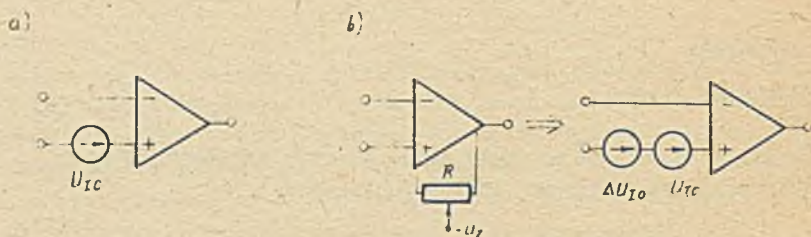
Streszczenie. Spełnienie warunków liniowej pracy wzmacniacza pomiarowego wymaga nieraz stosowania wzmacniaczy operacyjnych o bardzo wąskich tolerancjach niektórych parametrów. Tolerancje te można znacznie rozszerzyć poprzez strojenie parametru U_{I0} (wejściowego napięcia niezrównoważenia) wzmacniaczy operacyjnych, co jest realizowane za pomocą zewnętrznego potencjometru.

1. Wstęp

We wzmacniaczach pomiarowych prądu zmiennego pracujących przy dużych wzmocnieniach napięciowych istnieje konieczność wstępnej selekcji stosowanych wzmacniaczy operacyjnych ze względu na wartości wejściowych napięć niezrównoważenia U_{I0} . Selekcja ta ma na celu ograniczenie pojawiającej się na wyjściach wzmacniaczy operacyjnych składowej stałej we wzmocnionym napięciu zmiennym tak, by spełnione były warunki liniowej pracy układu. Kryterium przeprowadzania takiej selekcji, oparte na analizie obszaru sprawności dla parametrów U_{I0} z zastosowaniem metody "najgorszego przypadku" dla wartości pewnych parametrów układu przedstawiono w opracowaniu [1].

Z przeprowadzonych tamże rozważań wynika, że wartości parametrów U_{I0} muszą się czasem mieścić w bardzo wąskim zakresie, a w pewnych przypadkach zapewnienie liniowej pracy układu jest niemożliwe. Problem może być wtedy rozwiązany poprzez strojenie jednego (lub kilku) parametrów U_{I0} , rozumiane jako regulacja tego parametru wokół wartości nominalnej za pomocą zewnętrznego potencjometru dołączonego do odpowiednich wyprowadzeń wzmacniacza operacyjnego (dotyczy to niektórych typów tych wzmacniaczy).

Ideę strojenia parametru U_{I0} przedstawiono na rys. 1. Wzmacniacz operacyjny o wejściowym napięciu niezrównoważenia (w temperaturze odniesienia) równym $U_{I0}^{(o)}$ przedstawić można za pomocą schematu zastępczego z idealnym wzmacniaczem operacyjnym, na wejście którego włączona została SEM o wartości $U_{I0_1}^{(o)}$. Strojenie tego parametru za pomocą zewnętrznego potencjometru równoważne jest połączeniu w szereg z SEM $U_{I0_1}^{(o)}$ regulowanej SEM o wartości $\pm \Delta U_{I0_1}$, jak to pokazano na rys. 1b.



rys. 1. Schemat zastępczy rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego z uwzględnieniem wejściowego napięcia niezrównoważenia U_{IO}
 a - parametr U_{IO} niestrojony, b - parametr U_{IO} strojony

W niniejszym artykule przedyskutowany zostanie sposób zapewnienia warunków liniowej pracy wzmacniacza pomiarowego przy zastosowaniu minimalnej ilości strojonych parametrów U_{IO} .

2. Sformułowanie problemu

W artykule [1] pokazano, że napięcia niezrównoważenia $U_{j\text{ off}}$ ($j=1, \dots, n$) pojawiające się na wyjściach "n" wzmacniaczy operacyjnych wchodzących w skład wzmacniacza pomiarowego można przedstawić jako funkcje następujących parametrów:

- wejściowych napięć niezrównoważenia $U_{IO_i}^{(o)}$ ($i=1, \dots, n$) użytych wzmacniaczy operacyjnych,
- przyrostu temperatury ΔT ,
- prądów polaryzujących I_{b1} i I_{b2} obydwu wejść wzmacniacza pomiarowego,
- oporności wewnętrznych źródła sygnału R_{w1} i R_{w2} ,
- napięcia wspólnego U_{CN} pochodzącego ze źródła sygnału,
- współczynnika tłumienia sygnału wspólnego dla całego układu (tj. CMRR).

Napięcia $U_{j\text{ off}}$ nie mogą przekroczyć (co do modułu) pewnej wartości Λ_j tak dobranej, by wszystkie wzmacniacze operacyjne pracowały w zakresie liniowym dla pełnego zakresu zmian wejściowego, różnicowego napięcia mierzonego, czyli:

$$|U_{j\text{ off}}| \leq \Lambda_j^* \quad (j = 1, \dots, n) \quad (1)$$

Spełnienie warunków (1) można uzyskać stosując np. metodę "najgorszego przypadku" dla wartości parametrów wymienionych wyżej w punktach od b) do f) włącznie i wyznaczając obszar sprawności D_s dla parametrów $U_{IO_i}^{(o)}$ ($i = 1, \dots, n$). Ten n-wymiarowy obszar sprawności ograniczony jest hiperpo-

wierzchniami przedstawiającymi warunki sprawności ze względu na parametry $U_{IO_1}^{(o)}$ o postaci:

$$\left| \sum_{i=1}^n a_{ji} U_{IO_1}^{(o)} \right| \leq \Lambda_j = \Lambda_j^* - \Delta \Lambda_j^* \quad (j = 1, \dots, n) \quad (2)$$

gdzie:

a_{ji} - stałe, wyrażające wrażliwość bezwzględną napięcia niezrównoważenia U_j off na wyjściu j-tego wzmacniacza operacyjnego na wejściowe napięcie niezrównoważenia $U_{IO_1}^{(o)}$ i-tego wzmacniacza operacyjnego.

Wartość Λ_j otrzymuje się w wyniku odjęcia od Λ_j^* wartości składowych napięcia U_j off, dla których zastosowano metodę "najgorszego przypadku", (tj. $\Delta \Lambda_j^*$).

W [1] przedstawiono dwuwymiarowy przekrój obszaru sprawności D_n dla k-tego i m-tego parametru U_{IO} , w który wpisano prostokąt tolerancji D_T . Strojenie przynajmniej jednego z tych parametrów może dać znaczne powiększenie obszaru sprawności, co zostanie dalej wykazane.

3 Obliczenie tolerancji parametrów $U_{IO_1}^{(o)}$ z uwzględnieniem strojenia parametru $U_{IO_k}^{(o)}$

Niech $\bar{U}_{IO_k}^{(o)}$ oznacza nominalną wartość parametru $U_{IO_k}^{(o)}$, który może być strojony o wartość $\pm \Delta U_{IO_k}$ ("w górę" i "w dół"). Zatem aktualną wartość tego parametru można zapisać w postaci:

$$U_{IO_k}^{(o)} = \bar{U}_{IO_k}^{(o)} \pm \Delta U_{IO_k} \quad (3)$$

Obecnie można układ "n" nierówności (2) przekształcić w następujący sposób:

$$\left| \sum_{i=1, i \neq k}^n a_{ji} U_{IO_1}^{(o)} + a_{jk} (U_{IO_k}^{(o)} \pm \Delta U_{IO_k}) \right| \leq \Lambda_j \quad (j = 1, \dots, n)$$

czyli:

$$\left| \sum_{i=1}^n a_{ji} U_{IO_1}^{(o)} \right| \leq \Lambda_j' = \Lambda_j + \left| a_{jk} \Delta U_{IO_k} \right| \quad (j = 1, \dots, n) \quad (4)$$

Zbiór wartości parametrów $U_{IO_1}^{(o)}$ ($i = 1, \dots, n$), dla których spełniony jest układ nierówności (4), tworzy nowy n-wymiarowy obszar sprawności D_{sk} , który będzie tym większy, im większa będzie wartość współczynnika a_{jk} . Wynika stąd, że do strojenia winien być wybrany ten parametr $U_{IO_k}^{(o)}$, którego

wpływ na napięcie niezrównoważenia U_j off wyrażony współczynnikiem (wrażliwością) a_{jk} jest największy.

W celu wyznaczenia tolerancji parametrów $U_{IO}^{(o)}$ można zastosować np. kryterium minimalnej wrażliwości [2]. Rozwiązanie zadania sprowadza się zatem do minimalizacji "n" funkcji o postaci:

$$\left[a_{j1} U_{IO_1}^{(o)} \right]^2 + \left[a_{j2} U_{IO_2}^{(o)} \right]^2 + \dots + \left[a_{jn} U_{IO_n}^{(o)} \right]^2 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (5)$$

przy n ograniczeniach typu:

$$\left| a_{j1} U_{IO_1}^{(o)} + a_{j2} U_{IO_2}^{(o)} + \dots + a_{jn} U_{IO_n}^{(o)} \right| \leq \Lambda_j$$

Stosując metodę czynników nieoznaczonych Lagrange'a dla j-tej funkcji minimalizowanej z uwzględnieniem j-tego warunku ograniczającego należy obliczyć minimum "n" funkcji o postaci:

$$F_j = \left[a_{j1} U_{IO_1}^{(o)} \right]^2 + \left[a_{j2} U_{IO_2}^{(o)} \right]^2 + \dots + \left[a_{jn} U_{IO_n}^{(o)} \right]^2 + \lambda_j (a_{j1} U_{IO_1}^{(o)} + a_{j2} U_{IO_2}^{(o)} + \dots + a_{jn} U_{IO_n}^{(o)} - \Lambda_j) \quad (j = 1, \dots, n) \quad (6)$$

Minimum j-tej funkcji F_j otrzymuje się dla następujących wartości parametrów $U_{IO_1}^{(o)}, U_{IO_2}^{(o)}, \dots, U_{IO_n}^{(o)}$:

$$\left. \begin{aligned} (U_{IO_1}^{(o)})_{\max} &= \frac{\Lambda_j}{|a_{j1}|} \cdot \frac{1}{n} \\ (U_{IO_2}^{(o)})_{\max} &= \frac{\Lambda_j}{|a_{j2}|} \cdot \frac{1}{n} \\ (U_{IO_n}^{(o)})_{\max} &= \frac{\Lambda_j}{|a_{jn}|} \cdot \frac{1}{n} \end{aligned} \right\} \quad (j=1, \dots, n) \quad (7)$$

Minimalizację wszystkich "n" funkcji (5) można zatem zapewnić przyjmując następujące tolerancje dla parametrów U_{IO} :

$$\left. \begin{aligned} (U_{IO_1})_{\max} &= \min_{j=1, \dots, n} \left\{ \frac{\Lambda_j}{|a_{j1}|} \cdot \frac{1}{n} \right\} \\ (U_{IO_2})_{\max} &= \min_{j=1, \dots, n} \left\{ \frac{\Lambda_j}{|a_{j2}|} \cdot \frac{1}{n} \right\} \\ &\vdots \\ (U_{IO_n})_{\max} &= \min_{j=1, \dots, n} \left\{ \frac{\Lambda_j}{|a_{jn}|} \cdot \frac{1}{n} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (j=1, \dots, n) \quad (8)$$

Warto dodać, że identyczne rozwiązanie otrzymuje się stosując kryterium równości cząstkowych odchyień napięcia niezrównoważenia na wyjściu j -tego wzmacniacza operacyjnego, powodowanych przez każdy z parametrów $U_{IO_1}^{(o)}$ ($i=1, \dots, n$) [2]. Jeżeli bowiem przyjąć w oparciu o układ nierówności (4), że:

$$\left| \sum_{i=1}^n a_{ji} U_{IO_1}^{(o)} \right|_{\max} = \Lambda_j \quad (j = 1, \dots, n)$$

oraz, że odchylenie cząstkowe $a_{ji} U_{IO_1} \max$ jest takie samo dla każdego i -tego parametru U_{IO_1} , to:

$$\Lambda_j = n \left| a_{ji} \cdot U_{IO_1}^{(o)} \right|_{\max} \quad (j)$$

skąd:

$$(U_{IO_1} \max)^{(j)} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\Lambda_j}{|a_{ji}|} \quad (9)$$

co równoważne jest rozwiązaniu (7) i prowadzi do określenia tolerancji parametrów U_{IO_1} identycznego z (8).

4. Dobór tolerancji parametrów U_{IO} we wzmacniaczach pomiarowych prądu stałego

W artykule [1] przeanalizowano problem niezrównoważenia wzmacniacza pomiarowego prądu zmiennego wskazując na dopuszczalność występowania na wyjściu tego wzmacniacza pewnej składowej stałej, której obecność nie narusza warunków liniowej pracy układu. Uwzględnienie możliwości strojenia jednego (lub kilku) parametrów U_{IO} pozwala rozciągnąć przeprowadzoną analizę również na wzmacniacze pomiarowe prądu stałego. W tym celu przeanalizowane zostaną wyrażenia (1), (2), (3) i (4) dla $j=n$, czyli dla n -tego wzmacniacza operacyjnego, którego wyjście jest równocześnie wyjściem wzmacniacza pomiarowego.

Napięcie wyjściowe wzmacniacza pomiarowego $U_{wy \text{ off}}$ powinno zgodnie z (1) spełniać warunek:

$$\left| U_{wy \text{ off}} \right| \leq \Lambda_n^* \quad (10)$$

Przyjmując "najgorszy przypadek" dla wartości niektórych parametrów funkcji $U_{wy \text{ off}}$, warunek (10) można przez analogię do wyrażenia (2) sprowadzić do postaci:

$$\left| \sum_{i=1}^n a_{ni} U_{IO_1}^{(o)} \right| \leq \Lambda_n^* - \Delta \Lambda_n^* \quad (11)$$

Uwzględniając strojenie parametru $U_{IO_i}^{(o)}$ zgodnie ze wzorem (3) otrzymuje się następującą postać ograniczenia (4)^k dla $j=n$

$$\left| \sum_{i=1}^n a_{n_i} U_{IO_i}^{(o)} \right| \leq \Lambda'_n = \Lambda_n^* - \Delta \Lambda_n^* + \left| a_{nk} U_{IO_k}^{(o)} \right| \quad (12)$$

Ponieważ we wzmacniaczu pomiarowym prądu stałego $\Lambda_n^* = 0$, to zrównoważenie układu może nastąpić, jeżeli

$$\Lambda'_n = - \Delta \Lambda_n^* + \left| a_{nk} \Delta U_{IO_k} \right| > 0$$

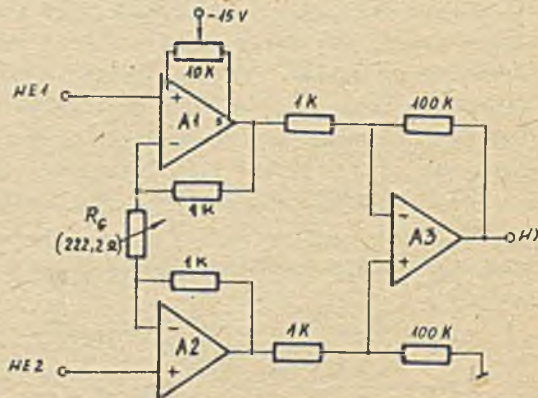
czyli:

$$\left| a_{nk} \Delta U_{IO_k} \right| > \Delta \Lambda_n \quad (13)$$

Jeśli warunek (13) nie jest spełniony, konieczne jest strojenie kolejnego (lub kilku) parametrów U_{IO} .

Przykład

Dla wzmacniacza pomiarowego prądu stałego zrealizowanego na trzech wzmacniaczach operacyjnych ULY7741N należy dobrać tolerancje parametrów U_{IO} tak, by napięcia niezrównoważenia na wyjściach wzmacniaczy A1 i A2 nie przekroczyły 9V, a cały układ można było zrównoważyć pojedynczym potencjometrem dołączonym do wzmacniacza A1 (rys. 2).



Rys. 2. Wzmacniacz pomiarowy zrealizowany na trzech wzmacniaczach operacyjnych

Prądy polaryzujące wejść WE1 i WE2 (I_{b1} i I_{b2}) mogą osiągać wartość do $0,5 \mu A$, oporności wewnętrzne źródła sygnału (R_{w1} i R_{w2}) obydwu wejść nie przekraczają 1 k Ω . Wejściowe napięcie wspólne U_{CM} o wartości do 8 V jest

tiumione przez układ przy wartości współczynnika CMRR nie mniejszej niż 10000 (czyli 80 dB). Temperatura pracy układu może się zmienić o wartość $\Delta T = 50^\circ\text{C}$, zaś współczynnik cieplny wejściowego napięcia niezrównoważenia wzmacniaczy operacyjnych (C_T) wynosi $7 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Jak pokazano w [1], napięcia niezrównoważenia na wyjściach wzmacniaczy operacyjnych A1, A2 i A3 można wyliczyć z zależności:

$$\begin{aligned}
 U_{1\text{off}} &= U_{IO_1}^{(o)} 5,5 - U_{IO_2}^{(o)} 4,5 + C_T \cdot \Delta T - I_{b1} \cdot R_{w1} \cdot 5,5 + I_{b2} R_{w2} \cdot 4,5 + U_{CM} \\
 U_{2\text{off}} &= -U_{IO_1}^{(o)} 4,5 + U_{IO_2}^{(o)} 5,5 + C_T \cdot \Delta T + I_{b1} \cdot R_{w1} \cdot 4,5 - I_{b2} R_{w2} \cdot 5,5 + U_{CM} \quad (14) \\
 U_{wyoff} &= 1000(U_{IO_2}^{(o)} - U_{IO_1}^{(o)}) + U_{IO_3}^{(o)} \cdot 101 + C_T \cdot \Delta T \cdot 101 + 1000(I_{b1} R_{w1} - I_{b2} R_{w2}) + \\
 &\quad + \frac{1000}{CMRR} \cdot U_{CM}
 \end{aligned}$$

Przyjmując wartości "najgorszego przypadku" dla parametrów $\Delta T, I_{b1}, I_{b2}, R_{w1}, R_{w2}, U_{CM}$ i CMRR w układzie równań (14), a także uwzględniając ograniczenie wartości napięć $U_{1\text{off}}, U_{2\text{off}}$ i U_{wyoff} otrzymuje się następujący układ nierówności:

$$\begin{aligned}
 |U_{IO_1}^{(o)} \cdot 5,5 - U_{IO_2}^{(o)} 4,5 + 8,01| &\leq 9 \\
 |-U_{IO_1}^{(o)} \cdot 4,5 + U_{IO_2}^{(o)} 5,5 + 8,01| &\leq 9 \quad (15) \\
 |-1000 U_{IO_1}^{(o)} + 1000 U_{IO_2}^{(o)} + 101 U_{IO_3}^{(o)} + 1,33| &\leq 0
 \end{aligned}$$

By ostatnia nierówność układu (15) była spełniona, konieczne jest strojenie parametrów U_{IO} . Jeżeli strojony będzie parametr $U_{IO_1}^{(o)}$, to zgodnie z wyrażeniem (3):

$$U_{IO_1}^{(o)} = U_{IO_1} \pm \Delta U_{IO}$$

Doświadczalnie stwierdzono możliwość strojenia parametru U_{IO} w zakresie $\pm 11,5$ mV. Uwzględniając strojenie parametru U_{IO_1} , można układ nierówności (15) sprowadzić do postaci:

$$\begin{aligned}
 |U_{IO_1}^{(o)} 5,5 - U_{IO_2}^{(o)} 4,5| &\leq 1,053 \\
 |-U_{IO_1}^{(o)} 4,5 + U_{IO_2}^{(o)} 5,5| &\leq 1,042 \quad (16) \\
 |-1000 U_{IO_1}^{(o)} + 1000 U_{IO_2}^{(o)} + 101 U_{IO_3}^{(o)}| &\leq 10,17
 \end{aligned}$$

Stosując wzory (7) i (8) dochodzi się do następujących ograniczeń na wartości parametrów U_{IO_1} , U_{IO_2} , U_{IO_3} :

$$\left| U_{IO_1}^{(o)} \right| \leq 3,39 \text{ mV}$$

$$\left| U_{IO_2}^{(o)} \right| \leq 3,39 \text{ mV}$$

$$\left| U_{IO_3}^{(o)} \right| \leq 33,5 \text{ mV}$$

Otrzymane wyniki wskazują na możliwość zrównoważenia wzmacniacza pomiarowego poprzez strojenie jednego tylko parametru U_{IO} , przy czym konieczna jest selekcja wzmacniaczy A1 i A2 ze względu na wartość nominalną parametrów $U_{IO_1}^{(o)}$ i $U_{IO_2}^{(o)}$.

LITERATURA

- [1] Szynowski J.: Dobór tolerancji wybranych parametrów we wzmacniaczu pomiarowym ze względu na ograniczenie napięcia niezrównoważenia. ZN Politechniki Śląskiej, Automatyka z. 65, Gliwice 1982.
- [2] Geher K.: Teoria tolerancji i wrażliwość układów elektronicznych. WNT Warszawa 1976.
- [3] Stybliński M.: Metody analizy i optymalizacji tolerancji parametrów układów elektronicznych. WNT, Warszawa 1981.
- [4] Graeme J.G. i in.: Operational amplifiers—design and applications. Mc Graw Hill Book Co., New York 1971.

Recenzent: Doc. dr inż. Aleksander Kwiciński

НАСТРОЙКА ИЗБРАННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЗНАЧЕНИЕ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Резюме

Выполнение условий линейной работы измерительного усилителя постоянного и переменного тока требует иногда применения операционных усилителей с очень узкими допусками на некоторые параметры. Допуски можно значительно увеличить "настраивая" параметр U_{IO} входное напряжение сдвига операционных усилителей, что осуществляется с помощью наружного потенциометра.

LIMITATION OF THE OUTPUT OFFSET VOLTAGE
OF AN INSTRUMENTATION AMPLIFIER BY TUNING OF SELECTED PARAMETERS

S u m m a r y

In many cases the fulfillment of the linear working conditions for the DC and AC instrumentation amplifiers (IA) makes necessary an assignment of very narrow tolerances on the parameters of the operational amplifiers (OA) used. These tolerances can be significantly widened with tuning of some parameters U_{I0} (OA's input offset voltages) by an external potentiometer.