

Jan SZYNOWSKI

Politechnika Śląska

DOBÓR TOLERANCJI WYBRANYCH PARAMETRÓW  
WE WZMACNIACZU POMIAROWYM  
ZE WZGLĘDU NA OGRANICZENIE NAPIĘCIA NIEZRÓWNOWAŻENIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono uogólnioną metodę optymalnego doboru tolerancji wejściowego napięcia niezrównoważenia dla wzmacniaczy operacyjnych wchodzących w skład wzmacniacza pomiarowego prądu zmiennego. Dobór ten ma na celu zapewnienie liniowej pracy wzmacniacza pomiarowego w całym zakresie zmian różnicowego napięcia wejściowego. Analizę tolerancji przeprowadzono przy zastosowaniu metody "najgorszego przypadku" dla wartości niektórych parametrów określających wielkość wyjściowego napięcia niezrównoważenia wzmacniacza pomiarowego oraz w oparciu o analizę obszaru sprawności dla pozostałych parametrów.

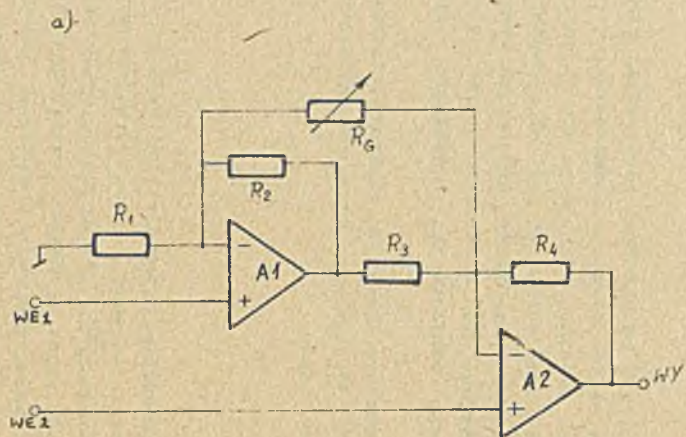
## 1. Wstęp

Wzmacniacze pomiarowe [3,4,5] są układami stosowanymi głównie do dokładnego wzmacniania bardzo małych sygnałów różnicowych, które występują często wraz z dużym sygnałem wspólnym. Realizuje się je za pomocą kilku wzmacniaczy operacyjnych objętych oporowymi pętlami sprzężenia zwrotnego. Najczęściej stosowane struktury wzmacniaczy pomiarowych wykorzystują dwa lub trzy wzmacniacze operacyjne, jak to pokazano na rys. 1 (podano też wyrażenia opisujące wzmocnienie różnicowe  $K_r$  uzyskiwane w każdej z tych struktur [4]).

Stosowane są również struktury oparte na większej liczbie wzmacniaczy operacyjnych, np. opisana w [3] struktura czterowzmacniaczowa zapewnia liniową regulację wzmocnienia układu.

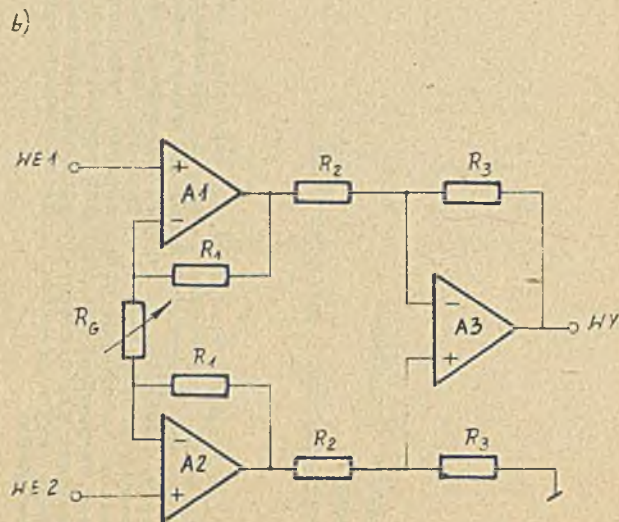
## 2. Sformułowanie problemu

Przy zerowym sygnale różnicowym pojawia się na wyjściu wzmacniacza pomiarowego pewne napięcie stałe spowodowane m.in. wejściowymi napięciami niezrównoważenia użytych wzmacniaczy operacyjnych, przepływem prądów polaryzujących wejść WE1 i WE2 przez oporności wewnętrzne źródła sygnału, jak też niedoskonałością tłumienia sygnału wspólnego. To wyjściowe napięcie niezrównoważenia można wyeliminować stosując dodatkowe elementy lub



$$K_r = \frac{U_{wy}}{U_{WE2} - U_{WE1}} = 1 + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_1 + R_4}{R_G}$$

(przy czym  $R_2 R_4 = R_1 R_3$ )



$$K_r = \frac{U_{wy}}{U_{WE2} - U_{WE1}} = \frac{R_3}{R_2} \left( 1 + \frac{2R_1}{R_G} \right)$$

Rys. 1. Przykłady wzmacniaczy pomiarowych



układy równoważące, jednakże może to pogorszyć pewne własności wzmacniacza pomiarowego (np. wypadkowe tłumienie sygnału wspólnego, tj. CMRR). Dlatego też w przypadku, gdy wzmacniany jest sygnał zmienny, można dopuścić występowanie na wyjściu wzmacniacza pomiarowego pewnego napięcia niezrównoważenia, które może być wyeliminowane w dalszym etapie przetwarzania.

Wzmocniony sygnał pomiarowy zawierać będzie zatem składową stałą, przy czym jej wartość winna być ograniczona (co do modułu) tak, by w każdym przypadku wzmacniacze operacyjne pracowały w zakresie liniowym. Aby powyższe wymaganie mogło być spełnione, konieczne jest nałożenie pewnych ograniczeń na wartości przyjmowane przez parametry tej składowej stałej. Celem niniejszego artykułu jest podanie metody obliczenia takich ograniczeń poprzez wyznaczenie obszaru sprawności dla niektórych z tych parametrów i przy zastosowaniu metody "najgorszego przypadku" dla wartości pozostałych parametrów.

### 3. Napięcie niezrównoważenia wzmacniacza pomiarowego

Wyjściowe napięcie niezrównoważenia wzmacniacza pomiarowego ( $U_{wy\ off}$ ), zrealizowanego ogólnie na "n" wzmacniaczach operacyjnych, można przedstawić jako sumę trzech składowych:

$$U_{wy\ off} = U_{wy\ off}' + U_{wy\ off}'' + U_{wy\ off}''' \quad (1)$$

Składowa  $U_{wy\ off}'$  pochodzi od wejściowych napięć niezrównoważenia  $U_{IO_1}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) użytych wzmacniaczy operacyjnych i jak łatwo wykazać, ma ona charakter liniowej zależności (2):

$$U_{wy\ off}' = \sum_{i=1}^n a_i U_{IO_1} \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

przy czym współczynniki  $a_i$ , będące funkcjami operności układu, możemy przyjąć jako stałe.

Napięcia  $U_{IO_1}$  są funkcjami temperatury zgodnie ze znanym związkiem:

$$U_{IO_1} = U_{IO_1}^{(0)} + C_{T_1} \cdot \Delta T \quad (3)$$

gdzie:

$U_{IO_1}^{(0)}$  - wejściowe napięcie niezrównoważenia i-tego wzmacniacza operacyjnego w temperaturze odniesienia,

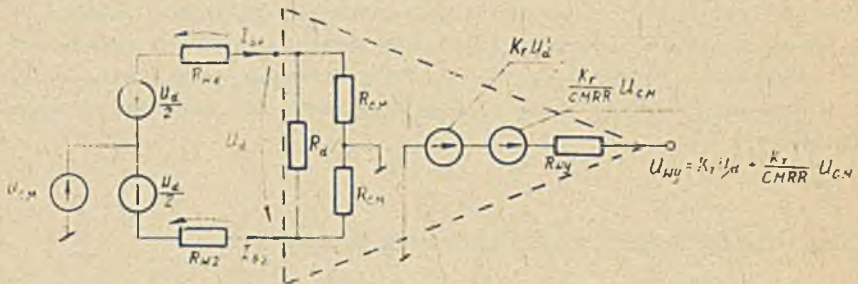
$C_{T_1}$  - współczynnik cieplny wejściowego napięcia niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego,

$\Delta T$  - zakres zmian temperatury.

Uwzględniając związek (3) można obecnie przedstawić napięcie  $U_{wy\ off}^*$  w następującej postaci:

$$U_{wy\ off}^* = \sum_{i=1}^n a_i U_{IO_i}^{(o)} + \sum_{i=1}^n a_i C_{T_i} \Delta T \quad (4)$$

W celu zilustrowania źródeł pochodzenia dodatkowych składowych niezrównoważenia układu przedstawiono na rys. 2 schemat zastępczy wzmacniacza pomiarowego [4].



Rys. 2. Schemat zastępczy wzmacniacza pomiarowego

Wynika z niego, że przy zerowym sygnale pomiarowym (różnicowym, tj.  $U_d$ ) na wejściu wzmacniacza pomiarowego pojawia się różnica napięć powstających na opornościach wewnętrznych źródła sygnału  $R_{w1}$  i  $R_{w2}$  w wyniku przepływu przez nie prądów polaryzujących  $I_{b1}$  oraz  $I_{b2}$  (są to wejściowe prądy polaryzujące wejście nieodwracających dwóch wzmacniaczy operacyjnych, do których doprowadzany jest sygnał pomiarowy). Ta różnica napięć jest  $K_r$ -krotnie wzmacniana w układzie ( $K_r$  - patrz rys. 1), co daje składową niezrównoważenia  $U_{wy\ off}^{**}$ :

$$U_{wy\ off}^{**} = K_r (I_{b1} R_{w1} - I_{b2} R_{w2}) \quad (5)$$

Dodatkowe niezrównoważenie wzmacniacza pomiarowego wynika ze skończonej wartości współczynnika tłumienia sygnału wspólnego  $U_{CM}$  (tj. CMRR):

$$U_{wy\ off}^{**} = \frac{K_r}{CMRR} U_{CM} \quad (6)$$

Całkowite wyjściowe napięcie niezrównoważenia układu można zatem wyrazić następującym równaniem:

$$U_{wy\ off} = \sum_{i=1}^n a_i U_{IO_i}^{(o)} + \sum_{i=1}^n a_i C_{T_i} \Delta T + K_r (I_{b1} R_{w1} - I_{b2} R_{w2}) + \frac{K_r}{CMRR} U_{CM} \quad (7)$$



Napięcie  $U_{wy\ off}$  stanowi składową stałą wzmacnionego sygnału zmiennego i nie może ono przekroczyć (co do modułu) pewnej z góry założonej wartości dopuszczalnej  $A$  po to, by przy maksymalnym sygnale pomiarowym układ nie wyszedł poza zakres liniowej pracy. Wymaga to należenia pewnych ograniczeń na wartości przyjmowane przez parametry równania (7) tak, by:

$$|U_{wy\ off}| \leq A \quad (8)$$

Równanie (7) wraz z ograniczeniem (8) dotyczy wyjścia  $n$ -tego wzmacniacza operacyjnego będącego równocześnie wyjściem wzmacniacza pomiarowego. Tymczasem na wyjściach pozostałych  $n-1$  wzmacniaczy operacyjnych zastosowanych w układzie pojawia się również napięcie niezrównoważenia, które może przyjmować wartości (co do modułu) większe niż  $U_{wy\ off}$ . Uwzględnienie tego faktu jest szczególnie ważne w przypadku dużego sygnału wspólnego  $U_{CM}$ , który to sygnał jest tłumiony dopiero we wzmacniaczu operacyjnym stopnia wyjściowego. I tak np. w strukturze dwuwzmacniaczowej (rys. 1a) napięcie  $U_{CM}$  jest we wzmacniaczu  $A_1$  wzmacniane w stosunku  $1+R_2/R_1$ , zaś w układzie trójwzmacniaczowym (rys. 1b) napięcie  $U_{CM}$  przechodzi w całości na wyjścia wzmacniaczy  $A_1$  i  $A_2$  [4]. Z powyższego wynika konieczność uzupełnienia warunku (8)  $n-1$  nierównościami wyrażającymi ograniczenie napięcia  $U_{j\ off}$  na wyjściu  $j$ -tego wzmacniacza operacyjnego do pewnej wartości  $B_j$ , czyli:

$$|U_{j\ off}| \leq B_j \quad j = 1, \dots, n-1 \quad (9)$$

Wyprowadzając zależności opisujące napięcia  $U_{j\ off}$  dla różnych struktur wzmacniaczy pomiarowych łatwo sprawdzić, że napięcia te są funkcją tych samych parametrów, co napięcie  $U_{wy\ off}$  dane równaniem (7). Ogólnie więc można napięcie  $U_{j\ off}$  zapisać w następującej postaci:

$$U_{j\ off} = \sum_{i=1}^n \alpha_{ji} U_{IO_1}^{(o)} + \sum_{i=1}^n \alpha_{ji} C_{T_i} \Delta T + \beta_j (I_{b1} R_{w1} - I_{b2} R_{w2}) + \gamma_j U_{CM} \quad j=1, \dots, n-1 \quad (10)$$

gdzie:

$\alpha_{ji}, \beta_j, \gamma_j$  - stałe.

Problem spełnienia ograniczeń (8) i (9) można rozwiązać np. poprzez wyznaczenie obszaru sprawności dla parametrów  $U_{IO_1}^{(o)}$ , przy zastosowaniu metody najgorszego przypadku dla wartości pozostałych parametrów.

W tym celu należy najpierw obliczyć maksymalne wartości składowych  $U''_{wy\ off}$  i  $U'''_{wy\ off}$  opisanych równaniami (5) i (6):

$$(U''_{wy\ off})_{\max} = K_r (I_{b1\max} R_{w1\max} - I_{b2\min} R_{w2\min}) \quad (11)$$

$$(U'''_{wy\ off})_{\max} = \frac{K_r}{CMRR_{\min}} \cdot U_{GM\max} \quad (12)$$

Składowa całkowitego napięcia niezrównoważenia układu pochodząca od parametrów  $U_{IO_1}^{(o)}$  nie może więc przekroczyć w temperaturze odniesienia pewnej wartości  $A'$ , tj.:

$$\left| \sum_{i=1}^n a_i U_{IO_i}^{(o)} \right| \leq A'$$

przy czym:

$$A' = A - (U''_{wy\ off})_{\max} - (U'''_{wy\ off})_{\max} - \sum_{i=1}^n a_i C_{T_i} \Delta T \quad (13)$$

Otrzymana wartość  $A'$  musi być oczywiście dodatnia, w przeciwnym razie należałoby zmienić wartości parametrów wyrażań (11) lub (12), bądź zawęzić zakres zmian temperatury ( $\Delta T$ ).

W podobny sposób jak dla napięcia wyjściowego  $U_{wy\ off}$  sformułować można  $n-1$  warunków ograniczających wartości parametrów  $U_{IO_1}^{(o)}$  tak, aby spełnione były nierówności (9), tj.:

$$\left| \sum_{i=1}^n \alpha_{j1} U_{IO_i}^{(o)} \right| \leq B'_j \quad j = 1, \dots, n-1 \quad (14)$$

gdzie  $B'_j$  jest różnicą między wartością  $B_j$  a maksymalną wartością sumy składowych pochodzących od  $I_{b1}$ ,  $I_{b2}$ ,  $U_{CM}$  oraz  $\Delta T$ .

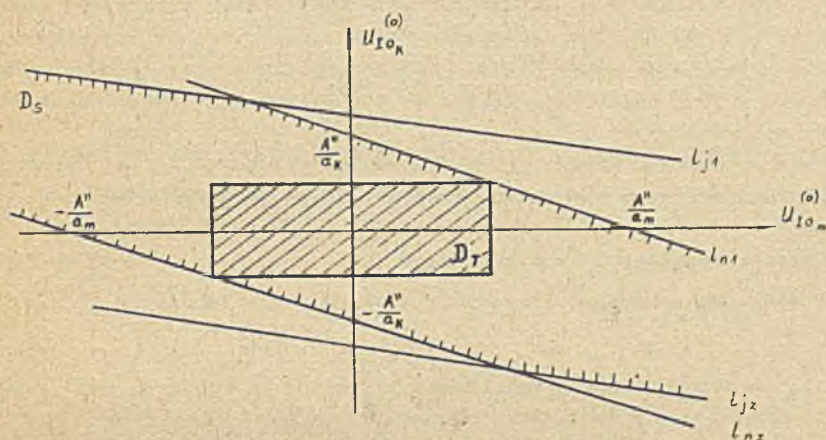
#### 4. Określenie obszaru sprawności ze względu na parametry $U_{IO_1}^{(o)}$

Zbiór wartości parametrów  $U_{IO_1}^{(o)}$  ( $i=1, \dots, n$ ), dla których napięcie  $U_{wy\ off}$  nie przekroczy (co do modułu) wartości  $A'$ , przy równoczesnym spełnieniu warunków liniowości układu (9) tworzy obszar sprawności  $D_s [1]$ , który można opisać w następujący sposób:

$$D_s = \left\{ \bigwedge_{i=1, \dots, n} \bigwedge_{j=1, \dots, n-1} : (U_{IO_1}^{(o)} \in D_s) \Rightarrow |U_{wy\ off}| \leq A' \wedge |U_{j\ off}| \leq B_j \right\}$$



Obszar sprawności  $D_s$  jest obszarem  $n$ -wymiarowym ograniczonym przez powierzchnie przedstawiające odpowiednie warunki sprawności. Dwuwymiarowy przekrój tego obszaru dla  $k$ -tego i  $m$ -tego parametru  $U_{IO}$  ograniczony jest przez  $2n$  prostych  $l_{j1}, l_{j2}$  ( $j = 1, \dots, n$ ), w które można wpisać prostokąt tolerancji  $D_T$  (rys. 3), np. w oparciu o kryterium maksymalnej powierzchni tego prostokąta (maksymalnej wartości iloczynu tolerancji) [2]:



Rys. 3. Obszar sprawności dla parametrów  $U_{IO_k}$  oraz  $U_{IO_m}$  wzmacniacza pomiarowego

Proste  $l_{n1}$  i  $l_{n2}$  wyrażają warunek (13), zaś proste  $l_{j1}$  i  $l_{j2}$  reprezentują jedną z  $n-1$  par prostych wynikających z układu nierówności (14). Współczynnik  $\Lambda''$  otrzymuje się w wyniku przyjęcia stałych wartości parametrów  $U_{IO_1}^{(o)}$  w nierówności (13) z wyjątkiem  $U_{IO_k}^{(o)}$  i  $U_{IO_m}^{(o)}$  oraz przeniesienia odpowiednich składowych tej nierówności na prawą stronę, to znaczy:

$$\left| a_k U_{IO_k}^{(o)} + a_m U_{IO_m}^{(o)} \right| \leq \Lambda'' = \Lambda' - \left| \sum_{i=1, i \neq k, m}^n a_i U_{IO_i}^{(o)} \right| \quad (15)$$

Z prostokąta tolerancji  $D_T$  wynika, że wartości parametrów  $U_{IO_k}^{(o)}$  i  $U_{IO_m}^{(o)}$  winny się mieścić w następujących zakresach:

$$U_{IO_k}^{(o)} \in \left\langle -\frac{\Lambda''}{2a_k}; \frac{\Lambda''}{2a_k} \right\rangle$$

$$U_{IO_m}^{(o)} \in \left\langle -\frac{\Lambda''}{2a_m}; \frac{\Lambda''}{2a_m} \right\rangle$$

### 5. Przykład liczbowy

Należy dobrać tolerancje dla parametrów  $U_{IO}$  we wzmacniaczach pomiarowych z rys. 1a i b, zrealizowanych na wzmacniaczach operacyjnych SFC2207. Napięcie niezrównoważenia na wyjściach tych wzmacniaczy nie może przekroczyć wartości 5V. Wzmocnienie różnicowe uzyskiwane w obydwu układach wynosi 1000. Zakłada się, że współczynnik CMRR całego układu nie może być mniejszy od 100 dB, zaś maksymalna (katalogowa) wartość wejściowych prądów polaryzujących wynosi 10 nA. Źródło sygnału o opornościach wewnętrznych dla obydwu wejść wynoszących do 100 k $\Omega$  zawiera składową stałą o wartości maksymalnej do 3 V.

Maksymalna zmiana temperatury pracy układu wynosi 30°C, zaś współczynnik cieplny wejściowego napięcia niezrównoważenia wzmacniaczy operacyjnych równa się 3  $\mu$ V/°C.

Wartości oporności są następujące:

$$a) \text{ dla struktury dwuzwzmacniaczowej: } R_1=R_2=R_3=R_4 = 100 \text{ [k}\Omega\text{]} \\ R_G = 200,4 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$b) \text{ dla struktury trójzwzmacniaczowej: } R_1 = 100 \text{ [k}\Omega\text{]}, R_2=R_3 = 20 \text{ [k}\Omega\text{]} \\ R_G = 200,2 \text{ [}\Omega\text{]}$$

Łatwo zauważyć, że wzmacniacz z rys. 1a nie może być zastosowany, jako że napięcie niezrównoważenia pochodzące jedynie od napięcia wspólnego  $U_{CM}$  może na wyjściu wzmacniacza A1 osiągnąć wartość 6V, czyli większą od dopuszczalnej. Należy zatem rozważyć zastosowanie struktury trójzwzmacniaczowej.

Napięcia niezrównoważenia na wyjściach wzmacniaczy operacyjnych A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub> z rys. 1b wyrażają następujące związki:

$$U_{1off} = U_{IO_1}^{(o)} 500,5 - U_{IO_2}^{(o)} 499,5 - I_{b1} R_{w1} 500,5 + I_{b2} R_{w2} 499,5 + U_{CM} \\ U_{2off} = -U_{IO_1}^{(o)} 499,5 + U_{IO_2}^{(o)} 500,5 + I_{b1} R_{w1} 499,5 - I_{b2} R_{w2} 500,5 + U_{CM} \\ U_{wyoff} = 1000(U_{IO_2}^{(o)} - U_{IO_1}^{(o)}) + U_{IO_3}^{(o)} + C_T \Delta T + 1000(I_{b1} R_{w1} - I_{b2} R_{w2}) + \\ + \frac{1000}{CMRR} U_{CM} \quad (16)$$

Stosując metodę "najgorszego przypadku" dla wartości parametrów  $U_{IO_3}^{(o)}$ ,  $\Delta T$ ,  $I_{b1}$ ,  $I_{b2}$ ,  $R_{w1}$ ,  $R_{w2}$ ,  $U_{CM}$  i CMRR w układzie równań (15) oraz uwzględniając ograniczenie wartości modułu napięć  $U_{1off}$ ,  $U_{2off}$  oraz  $U_{wyoff}$  do 5 V dochodzi się w wyniku prostych obliczeń do układu następujących nierówności:



$$\left| \frac{U_{I0_2}^{(o)}}{3,003} - \frac{U_{I0_1}^{(o)}}{2,99} \right| < 1 \quad [\text{mV}]$$

$$\left| \frac{U_{I0_2}^{(o)}}{2,99} - \frac{U_{I0_1}^{(o)}}{3,003} \right| \leq 1 \quad [\text{mV}] \quad (17)$$

$$\left| U_{I0_2}^{(o)} - U_{I0_1}^{(o)} \right| \leq 3,96 \quad [\text{mV}]$$

Z analizy obszaru sprawności dla parametrów  $U_{I0_1}^{(o)}$  i  $U_{I0_2}^{(o)}$  przeprowadzonej według opisanej wcześniej metody wynika, że wejściowe napięcia niezrównoważenia wzmacniaczy A1 i A2 nie mogą przekroczyć (co do modułu) wartości 1,49 [mV].

#### Podsumowanie

W artykule przedstawiono istotny element projektowania wzmacniaczy pomiarowych, wskazując na konieczność utrzymywania wartości parametrów  $U_{I0}$  w pewnych granicach ze względu na konieczność ograniczenia wartości wyjściowego napięcia niezrównoważenia w tych układach.

Przeprowadzane rozważania zostały zweryfikowane doświadczalnie. Wynika z nich konieczność selekcji wzmacniaczy operacyjnych ze względu na parametr  $U_{I0}$ , co może mieć szczególne znaczenie w przypadku masowej produkcji wzmacniaczy pomiarowych.

#### LITERATURA

- [1] Zabrodzki J.: Podstawy metodyczne i teoretyczno projektowania układów elektronicznych z uwzględnieniem rozrzutu wartości parametrów. Wyd. Pol. Warszawska, Warszawa 1978.
- [2] Geher K.: Teoria tolerancji i wrażliwości układów elektronicznych. WNT, Warszawa 1976.
- [3] Nadachowski M., Kulka Z.: Analogowe układy scalone. WKŁ, Warszawa 1979.
- [4] Riskin J.: A user's guide to IC IA - Analog Devices, Application Note nr 1/78.
- [5] Graeme J.G. i in.: Operational amplifiers - design and applications. McGraw Hill Book Co., New York 1971.

Recenzent: Doc. dr inż. Aleksander Kwieciński

ПОДБОР ДОПУСКОВ НА НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ  
ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ СДВИГА В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Р е з ю м е

В статье указан обобщенный метод оптимального подбора допуска на входное напряжение сдвига операционных усилителей входящих в состав измерительного усилителя переменного тока. Целью этого подбора является обеспечение линейности измерительного усилителя в полном диапазоне дифференциального напряжения. Анализ допусков проведен методом "наихудшего сочетания" значений некоторых параметров определяющих выходное напряжение сдвига а также на основе анализа "пространства правильного действия" для остальных параметров.

TOLERANCE ASSIGNMENT FOR SELECTED PARAMETERS  
IN THE AC INSTRUMENTATION AMPLIFIERS

S u m m a r y

The paper presents the generalized method of the optimal tolerances assignment of the input offset voltages for operational amplifiers to be used in instrumentation amplifiers (IA). This tolerance assignment is aimed at fulfilling the linear working conditions for the IA throughout the full range of the differential input voltages. The tolerance analysis has been carried out using the "worst case" method for some parameters' values and the acceptability region analysis for other parameters.