

Jacek KORYTKOWSKI

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW PIAP
Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

Współczesne wzmacniacze operacyjne z nadążną kompensacją wejściowego napięcia niezrównoważenia

Dr inż. Jacek KORYTKOWSKI



Urodzony w Warszawie, ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej 1956, doktorat 1972, docent 1978, prof. nzw. 2010. Kierownik Pracowni w Instytucie Elektrotechniki 1962-70. Jest laureatem kilkunastu nagród za wdrożenia przemysłowe w tym też Zespołowej Nagrody Państwowej 2-stopnia w 1976 roku. Posiada w swoim dorobku: 8 wydawnictw książkowych, 58 publikacji, 14 patentów polskich. Jest specjalistą w dziedzinie elektroniki przemysłowej.

e-mail: jkorytkowski@piap.pl

Streszczenie

W pracy omówiono zasadę działania monolitycznych wzmacniaczy operacyjnych z nadążną kompensacją wejściowego napięcia niezrównoważenia. Podano opis matematyczny charakterystyki wzmocnienia układu stosowanego w tego rodzaju wzmacniaczach oraz dokonano przeglądu właściwości nowych rozwiązań tych wzmacniaczy, produkowanych przez kilka przodujących firm światowych. Ważną zaletą nowych wzmacniaczy z nadążną kompensacją napięcia niezrównoważenia, w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami tych wzmacniaczy, jest uzyskanie bardzo małej wartości błędu niezrównoważenia. Typowa wartość tego błędu, odniesiona do wejścia wzmacniacza, jest rzędu jednego mikrowolta.

Słowa kluczowe: wzmacniacz operacyjny, wejściowe napięcie niezrównoważenia, nadążna kompensacja wejściowego napięcia niezrównoważenia.

Modern monolithic amplifiers with automatic zeroing correction of input offset voltage

Abstract

Monolithic amplifiers with automatic zeroing correction are useful for construction of circuits measuring very small voltages obtained from different measuring sensors. Fig. 1 shows the circuit diagram of a monolithic amplifier with automatic zeroing correction including characteristic elements representing the amplifier parameters. The circuit diagram of a component amplifier is presented in Fig. 2. It is one of two amplifiers cooperating in the measurement circuit with automatic zeroing correction (see Fig. 3). The characteristic of the measurement circuit amplifier with automatic zeroing correction is described based on Fig. 3. The large signal voltage gain of the measuring circuit amplifier with auto-zeroing is equal to the product of the correction and measurement channel gains. It was proved that the errors of the input offset voltage component amplifiers are decreased many times in relation to the correction channel gain value. Section 3 of this paper contains a review of monolithic amplifiers with automatic zeroing correction. Table 1 presents the parameter values of a selected group of the best monolithic amplifiers with auto-zeroing manufactured by several well known companies. From the analysis of the amplifier parameters one can draw a conclusion that the properties of monolithic amplifiers with auto-zeroing correction such as the input offset voltage, the temperature offset voltage drift and the long-term input offset voltage stability are very good.

Keywords: monolithic amplifier, input offset voltage, automatic zeroing correction of input offset voltage.

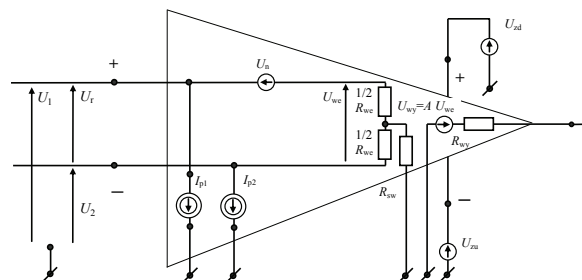
1. Wprowadzenie

Wzmacniacze małych wartości napięcia, w których zastosowano przetwarzanie napięcia stałego na zmienne, stosowane już są od kilku dekad [1, 2, 3]. W okresie ostatnich kilkunastu lat pojawiły się nowe typy wzmacniaczy, z cykliczną kompensacją wejściowego napięcia niezrównoważenia, powtarzaną z częstotliwością od kilkuset herców do kilkudziesięciu kiloherców. W literaturze angielskiej określa się je terminami: „auto-zero”, „zero-drift”

lub „auto-zeroing”. Wzmacniacze te charakteryzują się bardzo małymi wartościami wejściowego napięcia niezrównoważenia rzędu jednego mikrowolta oraz bardzo małymi dryftami temperaturowymi i małymi długoczasowymi dryftami tego napięcia. Tego rodzaju wzmacniacze są przede wszystkim stosowane w układach do pomiaru bardzo małych napięć i prądów stałych. Stosowane są w różnego rodzaju rozwiązaniach, takich jak: układy dopasowania czujników pomiarowych (termoogniwa, termorezystory, tensometry rezystancyjne, fotodiody, czujniki ciśnienia, czujniki przesunięć, czujniki samochodowe), wzmacniacze pomiarowe i systemy zbierania danych, ręczne testery sprzętu pomiarowego i automatyki, liczne rodzaje aparatów medycznych oraz wagi elektroniczne.

2. Zasada działania wzmacniacza z kompensacją napięcia niezrównoważenia

Podstawą budowy wzmacniacza z kompensacją napięcia niezrównoważenia jest typowy wzmacniacz operacyjny [4] o schemacie zastępczym, przedstawionym na rys. 1.



Rys. 1. Schemat układu wzmacniacza operacyjnego
Fig. 1. The circuit diagram of a monolithic amplifier

Opisy właściwości wzmacniacza operacyjnego i jego parametrów opisano m. in. w takich publikacjach, jak [5, 6, 7, 8]. Po wszechnie w tym celu używane są następujące symbole: napięcia wejściowe U_1 oraz U_2 , różnicowe napięcie wejściowe U_e , wejściowe napięcie niezrównoważenia U_n , prądy polaryzacji wejścia I_{p1} oraz I_{p2} , wejściowe napięcie sterujące U_{we} , rezystancja wejściowa R_{we} , rezystancja dla napięcia wspólnego R_{sw} , współczynnik wzmocnienia napięciowego A , napięcie wyjściowe $U_{wy} = A U_{we}$, rezystancja wyjściowa R_{wy} , dodatnie napięcie zasilania wzmacniacza U_{zd} , ujemne napięcie zasilania wzmacniacza U_{zu} .

Równanie przetwarzania wzmacniacza opisuje następująca zależność:

$$U_{wy} = A (U_1 - U_2 - U_n). \quad (1)$$

Współczesny wzmacniacz z nadążną kompensacją napięcia niezrównoważenia jest układem scalonym, zawierającym dwa składowe wzmacniacze operacyjne, odpowiednio współpracujące ze sobą w realizacji okresowego powtarzaniu cykli zerowania i próbkowania. W wyniku współpracy obu tych wzmacniaczy następuje kompensacja i wielokrotne zmniejszenie napięcia niezrównoważenia całego układu scalonego, który staje się wzmacniaczem operacyjnym o znacznie lepszych parametrach.

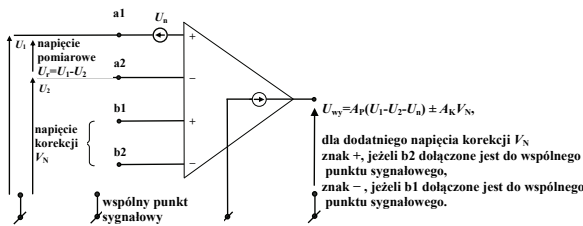
Należy stwierdzić, że w układzie wzmacniacza z nadążną kompensacją wejściowego napięcia niezrównoważenia nie następuje korekcja błędu spowodowanego prądami polaryzacji wejść I_{p1} oraz I_{p2} , a tylko kompensacja wejściowego napięcia niezrównoważenia U_n . Biorąc to pod uwagę, wzmacniacze z automatyczną korekcją zera powinny być nazywane wzmacniaczami z nadążną

kompensacją wejściowego napięcia niezrównoważenia, ale jest to zbyt długa nazwa. Dlatego w pracy używa się nazwy skróconej: wzmacniacze z kompensacją napięcia niezrównoważenia.

Literatura dotycząca układów wzmacniaczy z kompensacją napięcia niezrównoważenia [3, 8, 9, 15] podaje, że w układach tych są stosowane co najmniej dwa wzmacniacze składowe o nieco zmodyfikowanej budowie w stosunku do wzmacniacza z rys. 1. Schemat ideowy takiego wzmacniacza składowego pokazano na rys. 2. Jest to wzmacniacz sumujący o dwu wejściach różnicowych, zbudowany w sposób umożliwiający minimalizację napięcia niezrównoważenia zespołu dwóch wzmacniaczy. Końcówki a1 i a2 stanowią wejście różnicowe napięcia pomiarowego U_r o współczynniku wzmocnienia A_P (bardzo duża wartość wzmocnienia). Końcówki b1 i b2 stanowią drugie wejście różnicowe napięcia korekcyjnego V_N o współczynniku wzmocnienia A_K (mała wartość wzmocnienia, ale znacznie większa od wartości 1 V/V). Na schemacie z rys. 2 pominięto źródła prądów polaryzacji wejść, gdyż błędy spowodowane tymi prądami nie są korygowane.

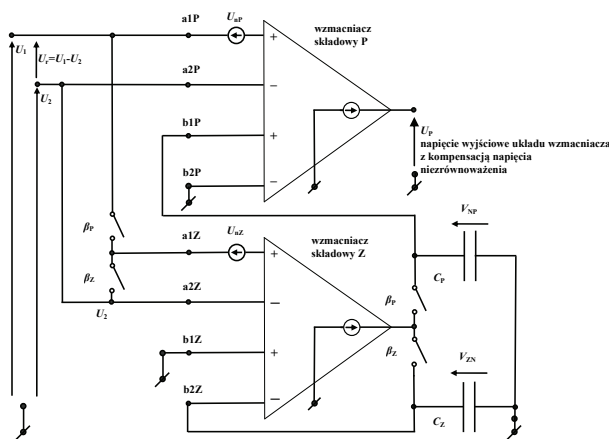
Wzmacniacz składowy opisuje następujące równanie przetwarzania:

$$U_{wy} = A_P(U_1 - U_2 - U_n) \pm A_K V_N \quad (2)$$



Rys. 2. Schemat ideowy wzmacniacza o dwu wejściach różnicowych używanego do budowy układu z kompensacją napięcia niezrównoważenia
Fig. 2. The circuit diagram of a component amplifier with two differential inputs used for construction of the measurement circuits with auto-zeroing

Schemat współpracy dwu wzmacniaczy składowych z rys. 2, tworzących układ pomiarowy wzmacniacza z kompensacją napięcia niezrównoważenia, pokazano na rys. 3. W układzie tym cykle zerowania i próbkowania są realizowane przez układ sterujący przełącznikami CMOS oznaczonymi jako β_Z (zamknięty w cyklu zerowania) oraz β_P (zamknięty w cyklu próbkowania). W układzie wzmacniacza z rys. 3 są wykorzystywane dwa kondensatory C_Z oraz C_P . Kondensatory te zapamiętują wartości napięcia z poprzedniego cyklu, dzięki odpowiednio dużej stałej czasowej obwodu rozładowania. Należy zwrócić uwagę, że w przełączniku analogowym CMOS w stanie przewodzenia nie występuje napięcie szczytkowe [4], więc nie wprowadza on dodatkowego napięcia w obwodzie wejściowym wzmacniacza składowego.



Rys. 3. Schemat układu wzmacniacza z kompensacją napięcia niezrównoważenia
Fig. 3. The circuit diagram of a monolithic amplifier with auto-zeroing

Zgodnie ze schematem z rys. 3, dla cyklu zerowania (przełączniki β_Z zamknięte, a β_P otwarte) wzmacniacz Z na swoim wyjściu, do którego przyłączony jest kondensator C_Z , wytwarza napięcie V_{NZ} opisane równaniem:

$$V_{NZ} = A_{PZ}(-U_{nZ}) - A_{KZ}V_{NZ}, \quad (3)$$

z którego wynika, że zachodzi:

$$V_{NZ} = \frac{A_{PZ}}{1 + A_{KZ}}(-U_{nZ}). \quad (4)$$

Zgodnie z równaniem (4), w cyklu zerowania wzmacniacz Z wytwarza na wejściu b2Z napięcie V_{NZ} , ujemne względem wspólnego punktu sygnałowego b1Z i proporcjonalne do swojego wejściowego napięcia niezrównoważenia. Wartość tego napięcia jest pamiętana na kondensatorze C_Z w czasie następnego cyklu próbkowania, dzięki odpowiednio bardzo dużej stałej czasowej rozładowania tego kondensatora przez rezystancję wejściową wejścia b2Z wzmacniacza.

Ze schematu z rys. 3, dla cyklu próbkowania (β_Z otwarty, a β_P zamknięty) i gdy uwzględnimy wzór (4) wynika, że wzmacniacz Z na swoim wyjściu na kondensatorze C_P wytwarza napięcie V_{NP} , które można opisać wzorem:

$$V_{NP} = A_{PZ}(-U_{nZ} + U_1 - U_2) - A_{KZ} \frac{A_{PZ}}{1 + A_{KZ}}(-U_{nZ}) = A_{PZ}(U_1 - U_2) - \frac{A_{PZ}U_{nZ}}{1 + A_{KZ}} \quad (5)$$

Natomiast napięcie wyjściowe wzmacniacza P, stanowiące napięcie wyjściowe układu wzmacniacza z kompensacją napięcia niezrównoważenia, wyraża się zależnością:

$$U_P = A_{PP}(U_1 - U_2 - U_{NP}) + A_{KP}V_{NP}. \quad (6)$$

Po uwzględnieniu wyrażenia (5) otrzymuje się wzór na napięcie wyjściowe:

$$U_P = A_{PP}(U_1 - U_2) + A_{KP}A_{PZ}(U_1 - U_2) + \frac{-A_{PP}A_{NP} - A_{PP}A_{KZ}U_{NP} - A_{PZ}A_{KP}U_{nZ}}{1 + A_{KZ}} \quad (7)$$

Biorąc pod uwagę, że $A_{KP}A_{PZ} \gg A_{PP}$ oraz, że $A_{PP}A_{KZ} \gg A_{PP}$, a także $A_{KZ} \gg 1$, w prawej stronie wzoru (7) można dokonać stosownych uproszczeń. W efekcie otrzymuje się:

$$U_P \approx A_{KP}A_{PZ}(U_1 - U_2) - A_{PP}U_{NP} - \frac{A_{PZ}A_{KP}U_{nZ}}{A_{KZ}}. \quad (8)$$

Producent układów scalonych monolitycznych [9], o schemacie zbliżonym do podanego na rys. 3, informuje, że można przyjmować równość odpowiednich współczynników wzmocnień wejść różnicowych dla dwu wzmacniaczy składowych Z i P jednego układu scalonego. Można więc przyjąć następujące zależności:

$$A_{KP} = A_{KZ} = A_K \text{ oraz } A_{PP} = A_{PZ} = A_P, \quad (9)$$

dla których wzór (8) opisujący charakterystykę wzmacniacza z nadążną kompensacją wejściowego napięcia niezrównoważenia upraszcza się do postaci:

$$U_P \approx A_K A_P (U_1 - U_2 - \frac{U_{NP}}{A_K} - \frac{U_{nZ}}{A_K}). \quad (10)$$

Ze wzoru (10) wynikają następujące wnioski. Wzmocnienie napięciowe układu wzmacniacza z kompensacją napięcia niezrównoważenia jest równe iloczynowi wzmocnienia A_P wejścia sygnału pomiarowego i wzmocnienia A_K wejścia sygnału korekcyjnego.

Tab. 1. Parametry wybranych wzmacniaczy z kompensacją napięcia niezrównoważenia
 Tab. 1. Values of the parameters of selected monolithic amplifiers with auto-zeroing

Producent			A	B	C	D	E	F	G
			Linear Technology	Analog Devices	Analog Devices	Maxim Integrated Products	Maxim Integrated Products	Texas Instruments	Analog Devices
Typ wzmacniacza			LT1150C	AD8628	ADA4051-1	MAX4238	MAX9619	TLC2652AC	OP97E
Literatura			[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16] bez kompensacji
Prąd polaryzacji wejścia I_p	pA	typ. maks.	10 100	30 100	20 70	1	31 80	4 60	30 100
Wejściowy prąd niezrównoważenia I_n	pA	typ. maks.	20 200	50 200	40 100	2	5 brak inf.	2 60	30 100
Wejściowe napięcie niezrównoważenia U_n	μ V	typ. maks.	0,5 10	1 5	2 17	0,1 2	0,8 10	0,5 1	10 25
Rezystancja dla napięcia wspólnego R_{sw}	M Ω	typ.	brak inf.	brak inf.	brak inf.	brak inf.	200	brak inf.	brak inf.
Rezystancja wejściowa R_{we}	M Ω	typ.	brak inf.	brak inf.	8	brak inf.	50	brak inf.	min. 30
Rezystancja wyjściowa R_{wy}	Ω	typ.	brak inf.	40 ²⁾	36 ²⁾	16 ²⁾	450 ²⁾	brak inf.	2600 ²⁾
Wzmocnienie napięciowe A (dla rezystancji obciążenia)	V/V	typ. min.	1000 10 ⁶ (10k) 5,6 10 ⁵ (10k)	18 10 ⁶ (10k) 18 10 ⁵ (10k)	5,6 10 ⁶ (10k) 5,6 10 ⁵ (10k)	31 10 ⁶ (10k) 18 10 ⁵ (1k) 18 10 ⁵ (1k)	100 10 ⁶ (100k) 8 10 ⁶ (5k) 10 10 ⁵ (5k)	32 10 ⁶ (10k) 56 10 ⁵ (10k)	2,0 10 ⁶ (10k) 1,1 10 ⁶ (2k) 3 10 ⁵ (2k)
Drift temperaturowy nap. niezrównoważenia δU_{nT}	nV/°C	typ. maks.	10 50	2 20	20 100	10 brak inf.	5 120	3 30	200 600
Drift długoczasowy nap. niezrównoważenia δU_{nt} odniesiony do jedn. czasu mierzonej liczbą miesięcy „mo” lub godzin „n h”	nV/ $\sqrt{\text{mo}}$ lub nV/ n h	typ.	50 nV/ $\sqrt{\text{mo}}$ mo= n 720h	brak inf.	brak inf.	50 nV/1000 h	brak inf.	typ. 3 nV/720 h, maks. 30 nV/720 h	300 nV/720 h
Drift temperaturowy prądu polaryzacji δI_{pt}	pA/°C	typ.	0,6 ²⁾	0,6 ²⁾	0,2 ²⁾	brak inf.	1 ²⁾	0,1 ²⁾	0,4
Napięcia zasilania podwójne $\pm U_z$ lub unipolarne U_z	V	min. typ. maks. min. typ. maks.	$\pm 2,4$ ± 15 ± 16 32	$\pm 1,35$ $\pm 2,5$ 2,7 5 6	 1,8 5 6	 2,7 5 6	$\pm 0,8$ $\pm 2,75$ 1,6 3,3 5,5	$\pm 1,9$ ± 5 ± 8	± 2 ± 15 ± 20
Pobór prądu zasilania I_z	μ A	typ. maks.	800 1500	850 1100	15 18	600 850	59 78	1500 2400	380 600
Szybkość narastania sygnału wyjściowego SR	V/ μ s	typ.	3	1	0,06 (SR+) 0,04 (SR-)	0,35	0,7	2,8 (SR+) 3,1 (SR-)	0,2
Częstotliwość taktowania nadążnej kompensacji	kHz		0,55 dla $\pm 15V$, 0,3 dla $\pm 5V$	15 ³⁾ (clock frequency)	40 ³⁾ (chopping frequency)	10 – 15 (pseudorandom frequency)	50 ²⁾	0,45 ³⁾ dla $\pm 5V$, 0,5 dla $\pm 1,9V$	nie ma nadążnej kompensacji
Funkcja sterowanego wyłączania (shutdown, clamp-off)			nie	nie	nie	tak	tak	tak	nie

Uwaga ¹⁾ Układ wymaga dwu zewnętrznych foliowych kondensatorów 0,1–1 μ F.

Uwaga ²⁾ Wyznaczono z charakterystyk zawartych w danych technicznych producenta układu.

Uwaga ³⁾ Zastosowano opatentowaną zasadę pracy układu auto-zerowania.

Skompensowane wejściowe napięcia niezrównoważenia układu wzmacniacza z kompensacją napięcia niezrównoważenia jest $1/A_K$ krotnie mniejsze od wartości sumy napięć niezrównoważenia U_{np} i U_{nz} wzmacniaczy składowych P i Z.

Konstruktorzy układów monolitycznych wzmacniaczy zapewniają wartość wzmocnienia A_K znacznie większą od jedności (od 10 V/V do 100 V/V). Dzięki temu powstały nowe rozwiązania wzmacniaczy, o parametrach zestawionych w tabeli 1. Dzięki temu możliwe jest znaczne obniżenie typowych wartości napięcia niezrównoważenia wzmacniaczy do 0,5 μ V [10, 15], a nawet do 0,1 μ V [13].

3. Przegląd parametrów wzmacniaczy z kompensacją napięcia niezrównoważenia

Wzmacniacze z kompensacją napięcia niezrównoważenia cechuje bardzo duża wartość wzmocnienia oraz odporność parametrów na zmiany warunków pracy (temperatura otoczenia, napięcia zasilania), a także możliwość długotrwałej, wieloletniej pracy, bez potrzeby częstego wzorcowania układów pomiarowych. W tabeli 1 w kolumnach od A do F zamieszczono wartości parametrów najlepszych monolitycznych wzmacniaczy z kompensacją napięcia niezrównoważenia produkcji kilku przodujących firm światowych: LT1150C

[10] Linear Technology, AD8628 [11] i ADA4051-1 [12] Analog Devices, MAX4238 [13], MAX9619 [14] Maxim Integrated Products oraz TLC2652A [15] Texas Instruments. Należy zauważyć, że tabela 1 obejmuje parametry wzmacniaczy pojedynczych (z tzw. jednym kanałem), ale firmy oferują niektóre typy wzmacniaczy jako podwójne i poczwórne. Przykładowo typowi AD8628 towarzyszy wersja AD8629 zawierająca dwa wzmacniacze oraz AD8630 zawierająca cztery wzmacniacze, a typowi ADA4051-1 towarzyszy wersja ADA4051-2 zawierająca dwa wzmacniacze.

W tabeli 1 w kolumnie G podano parametry jednego z najlepszych wzmacniaczy monolitycznych, w którym nie jest stosowana kompensacja napięcia niezrównoważenia. Umożliwia to porównanie wzmacniaczy z kompensacją napięcia niezrównoważenia (kolumny od A do F) z jednym z najlepszych wzmacniaczy, w których nie jest stosowana kompensacja.

Wzmacniacze przedstawione w tabeli 1 cechuje bardzo duża wartość współczynnika wzmocnienia napięciowego, którego wartość typowa jest zawarta w zakresie od $5 \cdot 10^6$ V/V do $1 \cdot 10^9$ V/V. Wzmacniacze te charakteryzują się bardzo małymi typowymi wartościami wejściowego napięcia niezrównoważenia w przedziale od 0,1 μ V do 2 μ V, które są wielokrotnie mniejsze od napięć uzyskiwanych w najlepszych klasycznych wzmacniaczach (kolumna G 10 μ V).

Maksymalne wartości tych napięć zawierają się w granicach od 1 μV do 17 μV , toteż nie stosuje się w nich zerowania za pomocą zewnętrznego potencjometru strojeniowego. Typowe dryfty temperaturowe napięcia niezrównoważenia są bardzo niewielkie i mieszczą się w przedziale od 2 nV/°C do 20 nV/°C, są zatem wielokrotnie mniejsze niż w klasycznych wzmacniaczach (kolumna G 200 nV/°C). Typowe dryfty długoczasowe napięcia niezrównoważenia są zawarte w przedziale od 3 nV/720 h do 50 nV/1000 h, więc są znacznie mniejsze niż w klasycznych wzmacniaczach (kolumna G 300 nV/720 h).

Rezystancja wejściowa dla wejścia różnicowego wzmacniaczy z kompensacją napięcia niezrównoważenia przyjmuje wartości z przedziału od 8 M Ω do 50 M Ω , które są zbliżone do wartości charakterystycznych dla klasycznych wzmacniaczy monolitycznych. Rezystancja dla napięcia wspólnego jest rzadko podawana. Należy jednak zauważyć, że jest ona duża i wynosi około 200 M Ω (kolumna E). W klasycznych wzmacniaczach elektrometrycznych osiąga ona wartości do 10¹² Ω [4].

Wzmacniacze z kompensacją charakteryzują się małymi typowymi wartościami prądu polaryzacji wejścia od 1 pA do 30 pA oraz bardzo małymi typowymi wartościami dryftu temperaturowego prądu polaryzacji wejścia od 0,1 pA/°C do 1 pA/°C.

Współczesne wzmacniacze z kompensacją napięcia niezrównoważenia są przystosowane do pracy przy bardzo małych podwójnych napięciach zasilania począwszy: od $\pm 0,8$ V aż do ± 15 V lub przy pojedynczym napięciu zasilania od 1,6 V do 32 V. W większości rozwiązań stosuje się typowe napięcia zasilania 5 V oraz 3,3 V. Wzmacniacze te charakteryzują się umiarkowanymi wartościami prądów zasilania od 59 μA do 1,5 mA, co oznacza w skrajnym przypadku (przy napięciu zasilania 1,6 V i przy prądzie 59 μA) bardzo mały pobór mocy poniżej 100 μW . Znacząca część wzmacniaczy ma funkcję wyłączania (shutdown), pozwalającą na oszczędzanie energii pobieranej z baterii.

Bardzo rzadko producenci wzmacniaczy podają informacje o wartości rezystancji wyjściowej wzmacniacza. Jak wynika to z charakterystyk podawanych przez producentów wzmacniaczy z kompensacją, rezystancja ta przyjmuje małe wartości w porównaniu z rezystancją obciążenia, która wynosi od kilkunastu omów do ok. 0,5 k Ω .

Wszystkie wzmacniacze wyposażone są w miniaturowe obudowy przystosowane do montażu płaskiego.

4. Podsumowanie

W artykule opisano jedną z metod automatycznej korekcji zera wzmacniaczy operacyjnych, wykorzystywaną w konstruowaniu monolitycznych wzmacniaczy operacyjnych o bardzo dobrych parametrach i umiarkowanych cenach. Z przeprowadzonego przeglądu parametrów współcześnie produkowanych wzmacniaczy z nadążną kompensacją napięcia niezrównoważenia wynika wniosek, że te układy scalone stanowią wartościowy element torów pomiarowych współczesnych urządzeń elektronicznych.

5. Literatura

- [1] Bajda L. I., Siemienkiewicz A. A.: Elektroniczne wzmacniacze prądu stałego. Państwowe Wydawnictwa Techniczne. Warszawa 1956.
- [2] Mędrzycki J.: Technika analogowa i hybrydowa. Układy operacyjne i programowanie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1974.
- [3] Harasimowicz J.: Przegląd scalonych wzmacniaczy operacyjnych. Specjalne typy wzmacniaczy operacyjnych. Biuletyn Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów „MERA-PIAP”, 4-5/54-55, 1975.
- [4] Korytkowski J.: Liniowe i nieliniowe układy ze wzmacniaczami monolitycznymi w urządzeniach pomiarowych. Oficyna Wydawnicza PIAP. Warszawa 2011.
- [5] Korytkowski J.: Współczesne wzmacniacze monolityczne w układach i systemach pomiarowych (1). Pomiary Automatyka Robotyka, nr 2, 2009.
- [6] Ciążyński W. E.: Elektronika analogowa w zadaniach. Tom 5. Idealne wzmacniacze operacyjne w zastosowaniach liniowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2010.
- [7] Kaźmierkowski M. P., Matysik J. T.: Wprowadzenie do elektroniki i energoelektroniki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2005.
- [8] Nawrocki Z.: Wzmacniacze operacyjne i przetworniki pomiarowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2008.
- [9] Analog Devices Inc.: Auto-Zero Amplifiers. White Paper. www.analog.com/static/imported-files/tech_articles/197774722Auto-zero.whitepaper.doc.
- [10] Linear Technology Corporation: LTC1150 ± 15 V Zero-Drift Operational Amplifier with Internal Capacitors. 1150fb. LW/TP 1202 1K REV B. PRINTED IN USA. 1991.
- [11] Analog Devices Inc.: AD8628/AD8629/AD8630 Zero-Drift, Single-Supply, Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifier. D02735-0-4/11(I) Rev. I. USA 2011.
- [12] Analog Devices Inc.: AD4051-2 - 1,8V, Micropower, Zero-Drift, Rail-to-Rail Input/Output Op Amp. D08056-0-1/10(B) Rev. B. USA 2010.
- [13] Maxim Integrated Products: MAX4238/MAX4239 - Ultra-Low Offset/Drift, Low Noise, Precision SOT23 Amplifiers. 19-2424; Rev 2; 5/06. USA 2006.
- [14] Maxim Integrated Products: MAX9617-MAX9620 - Single/Dual SC70, Zero-Drift, High-Efficiency, 1,5MHz Op Amps with RRIO. 19-4753; Rev 4; 2/11. USA 2011.
- [15] Texas Instruments Incorporated: TLC2652, TLC2652A, TLC2652Y - Advanced LinCMOSTM Precision Chopper-Stabilized Operational Amplifiers. SLOS019D-September 1988 - Revised April 2001. USA 2001.
- [16] Analog Devices Inc.: OP97 - Low Power, High Precision Operational Amplifier. C00299-0-1/02(D). Rev. F. USA 2007.

otrzymano / received: 30.06.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.11.2012

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Informacja redakcji dotycząca artykułów współautorskich

W miesięczniku PAK od numeru 06/2010 w nagłówkach artykułów współautorskich wskazywany jest autor korespondujący (Corresponding Author), tj. ten z którym redakcja prowadzi wszelkie uzgodnienia na etapie przygotowania artykułu do publikacji. Jego nazwisko jest wyróżnione drukiem pogrubionym. Takie oznaczenie nie odnosi się do faktycznego udziału współautora w opracowaniu artykułu. Ponadto w nagłówku artykułu podawane są adresy korespondencyjne wszystkich współautorów.

Wprowadzona procedura wynika z międzynarodowych standardów wydawniczych.