

Współczesne wzmacniacze monolityczne w układach i systemach pomiarowych (1)

► Jacek Korytkowski

Podano definicje parametrów wzmacniacza i jego schemat, przedstawiono wielkości wpływające na parametry wzmacniacza, omówiono charakterystyczne grupy wzmacniaczy stosowanych w układach i systemach pomiarowych oraz dokonano przeglądu parametrów wybranych typów współczesnych wzmacniaczy monolitycznych.

W dobie powszechnej dominacji układów mikroprocesorowych, do budowy elektronicznych urządzeń i systemów pomiarowych stosowane są powszechnie układy liniowe wzmacniaczy monolitycznych. Właściwości współczesnych wzmacniaczy monolitycznych są rzadko opisywane w ogólnodostępnej literaturze technicznej [1, 2]. Wzmacniacze monolityczne umożliwiają realizację licznych układów, m. in.:

- wzmacniacze pomiarowe niskopoziomowych sygnałów elektrycznych
- przetworniki pomiarowe do czujników elektrycznych generacyjnych i parametrycznych
- źródła sygnałów wzorcowych
- symulatory rezystancji
- multimetry cyfrowe
- przetworniki cyfrowo-analogowe i analogowo-cyfrowe
- stanowiska pomiarowe do kontroli właściwości metrologicznych urządzeń i systemów pomiarowych.

Wzmacniacz monolityczny, zwany też wzmacniaczem operacyjnym, stał się podstawowym elementem, na bazie którego realizuje się różne funkcje formowania sygnałów w układach elektronicznych stosowanych w urządzeniach i systemach pomiarowych. W 1962 r. amerykańskie firmy Burr-Brown Research Corporation oraz Philbrick Research Inc. wprowadziły na rynek modułowe, tranzystorowe wzmacniacze operacyjne. Pierwsze monolityczne wzmacniacze operacyjne powszechnie stosowane przez użytkowników pochodziły z firmy Fairchild Semiconductor (1965 r.). Były to wzmacniacze serii $\mu A700$. Początkowo najbardziej popularny był wzmacniacz $\mu A741$, którego odpowiedniki stanowiły podstawowy program produkcyjny wielu firm oferujących liniowe układy scalone, w tym firm z Europy Środkowej, np. TESLA (MAA741) czy UNITRA (ULY7741). Na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych pojawiły się inne wzmacniacze zaliczane do wzmacniaczy drugiej generacji, np. $\mu A725$ – wysokostabilny, $\mu A776$ – programowany o niskiej mocy pobieranej, $\mu A740$ stosujący tranzystory zarówno bipolarne, jak i unipolarne o znacznie szerszym, częstotliwościowym paśmie prze-

noszonych sygnałów, a także wzmacniacz o bardzo małych prądach wejściowych, jak np. LM 101A firmy National Semiconductor, który wykorzystuje w stopniu wejściowym tranzystory komplementarne *nnp* i *pnnp* w układzie super beta. Lata siedemdziesiąte przyniosły wzmacniacze monolityczne trzeciej generacji, np. typu mono OP-07 firmy Precision Monolithics Inc, strojone laserem o znacznie lepszych parametrach wzmacniania sygnałów napięcia stałego.

Od końca lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku do pierwszych lat obecnego stulecia, dzięki postępowi technologii, specjalistyczne firmy takie, jak Analog Devices, Burr-Brown współdziałająca z Texas Instruments, Linear Technology, National Semiconductor, Fairchild Semiconductor, Maxim Integrated Products i inne opracowały oraz produkują zmodernizowane lub nowe typy wzmacniaczy monolitycznych o znacznych i korzystnych zmianach parametrów.

Nowe typy wzmacniaczy, oprócz poprawy parametrów, charakteryzuje miniaturyzacja i znaczne zwiększenie upakowania. Liczne publikacje [2, 3, 4] opisują układy przetwarzania sygnałów z zastosowaniem kilku jednakowych wzmacniaczy. Toteż większość producentów liniowych układów monolitycznych opracowała i produkuje w pojedynczych obudowach układy scalone zawierające jeden, dwa lub cztery (rzadko trzy) takie same wzmacniacze. Przeważnie firmy oferują układy scalone z pojedynczymi, podwójnymi i poczwórnymi wzmacniaczami w obudowach standardowych typu PDIP-T8 (osiem końcówek) i typu PDIP-T14 (czternaście końcówek) do montażu na płytach drukowanych oraz w różnych wersjach obudów miniaturowych do montażu płaskiego, przeważnie są to PDSO-G8 i PDSO-G14. Zdarzają się też wersje tylko w obudowach miniaturowych. Nowe opracowanie (maj 2008 r.) Fairchild Semiconductor bardzo szybkiego wzmacniacza pojedynczego FAN4174 [5] oraz analogicznego wzmacniacza podwójnego FAN4274 przewiduje tylko obudowy miniaturowe. Najmniejszą obudową wzmacniacza pojedynczego jest 5-Lead SC-70 o wymiarach 2 mm×2,1 mm×1,1 mm. Dla wzmacniacza podwójnego jest to obudowa 8-Lead MSOP o wymiarach 3 mm×4,9 mm×1,1 mm.

Wzmacniacz monolityczny jest wielotranzystorowym układem wzmacniającym o sprzężeniach bezpośrednich, zawierającym kilka stopni wzmacniania

► dr inż. Jacek Korytkowski

o bardzo dużym współczynniku wzmocnienia napięciowego od 10^4 V/V do 10^8 V/V, przewidzianym do pracy w szerokim przedziale częstotliwości od zera (wzmacnianie napięć stałych) do kilku herców lub nawet do kilkudziesięciu megaherców (np. 70 MHz typ FHP3132 Fairchild Semiconductor [6]).

Wzmacniacz monolityczny jest tak zaprojektowany, że pracuje stabilnie bez wzbudzeń przy bardzo głębokich ujemnych sprzężeniach zwrotnych wytwarzanych przez zewnętrzne obwody sprzężenia zwrotnego typu rezystancyjnego, które formują charakterystyki przetwarzania sygnałów, a parametry samego wzmacniacza nie wpływają w sposób decydujący na te charakterystyki.

W dalszej części przypomniano określenia ważniejszych parametrów wzmacniacza, podano jego schemat, przedstawiono wielkości wpływające na parametry wzmacniacza, opisano charakterystyczne grupy wzmacniaczy wykorzystywanych do układów i systemów pomiarowych oraz dokonano przeglądu parametrów wybranych typów współczesnych wzmacniaczy.

Parametry wzmacniacza

Wzmacniacz monolityczny jest wzmacniaczem różnicowym o dwu końcówkach wejścia: nieinwersyjnej „+” i inwersyjnej „-”, które pracują prawie niezależnie od wartości średniego poziomu napięć na tych końcówkach, w zagwarantowanym przez producenta zakresie napięć wejściowych. Wzmacniacz ten ma jedną końcówkę wyjściową sterowanego źródła napięcia wyjściowego, którego drugi biegun jest połączony ze wspólnym punktem zasilania wzmacniacza. Napięcie sterowanego źródła wyjściowego wzmacniacza jest sterowane różnicą napięć doprowadzonych do wejścia nieinwersyjnego „+” oraz wejścia inwersyjnego „-” (schemat zastępczy na rys. 1).

Wejściowe napięcie wspólne: wartość średnia napięć doprowadzonych pomiędzy wspólnym punktem zasilania a zaciskami wejściowymi:

$$U_w = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad (1)$$

Różnicowe napięcie wejściowe: różnica napięć pomiędzy zaciskami wejściowymi wzmacniacza:

$$U_r = U_1 - U_2 \quad (2)$$

Prąd polaryzacji wejścia: wartość prądu wpływającego do końcówki wejściowej wzmacniacza I_p :

- prąd polaryzacji wejścia nieinwersyjnego I_{p1}
- prąd polaryzacji wejścia inwersyjnego I_{p2}

Wejściowy prąd niezrównoważenia: różnica wartości prądów polaryzacji wejść:

$$I_n = I_{p1} - I_{p2} \quad (3)$$

Wejściowe napięcie niezrównoważenia: jest to takie różnicowe napięcie wejściowe, które przy swo-

bodnym dopływie prądów polaryzacji wejść wzmacniacza powoduje, że napięcie wyjściowe jest równe zero; napięcie niezrównoważenia oznacza się symbolem: U_n

Rezystancja dla napięcia wspólnego: iloraz przyrostu napięcia wspólnego i odpowiedniego przyrostu sumy prądów polaryzacji obydwu wejść, dla takich wartości napięcia różnicowego, przy których napięcie wyjściowe jest równe zero:

$$R_{sw} = \frac{\Delta U_w}{\Delta I_{p1} + \Delta I_{p2}} \quad (4)$$

Rezystancja wejściowa: iloraz przyrostu napięcia różnicowego i odpowiadającego mu przyrostu prądu niezrównoważenia przy napięciu wspólnym równym zero:

$$R_{wc} = \frac{\Delta U_r}{\Delta I_n} \quad (5)$$

Rezystancja wyjściowa: wartość zastępczej rezystancji szeregowej źródła napięcia wyjściowego; rezystancję wyjściową oznacza się: R_{wy}

Napięcie wyjściowe: napięcie wyjściowe wzmacniacza względem wspólnego punktu zasilania mierzone przy pomijalnym spadku napięcia na rezystancji wyjściowej; napięcie wyjściowe oznacza się: U_{wy}

Wzmocnienie napięciowe: iloraz przyrostu napięcia wyjściowego oraz odpowiadającego mu przyrostu napięcia różnicowego:

$$k_U = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_r} \quad (6)$$

Współczynnik tłumienia napięcia wspólnego: iloraz (lub 20 logarytmów ilorazu) zmiany wartości napięcia wspólnego ΔU_w i wytworzonej przez to napięcie wspólne zmiany wartości napięcia niezrównoważenia ΔU_{nw} przy niezmiennionej wartości napięcia wyjściowego:

$$WTNW = \frac{\Delta U_w}{\Delta U_{nw}} \quad (7a)$$

$$WTNW \log = 20 \log_{10} \frac{\Delta U_w}{\Delta U_{nw}} \quad (7b)$$

Współczynnik tłumienia zmian napięcia zasilania: iloraz (lub 20 logarytmów ilorazu) zmiany wartości symetrycznego dwu biegunowego napięcia zasilania ΔU_z i wywołanej nią zmiany wartości napięcia niezrównoważenia ΔU_{nz} przy niezmiennionej wartości napięcia wyjściowego:

$$WTNZ = \frac{\Delta U_z}{\Delta U_{nz}} \quad (8a)$$

$$WTNZ \log = 20 \log_{10} \frac{\Delta U_z}{\Delta U_{nz}} \quad (8b)$$

Dryft temperaturowy napięcia niezrównoważenia: różnica między wartościami napięcia niezrównoważenia U_{nT2} dla temperatury T_2 i U_{nT1} dla temperatury T_1 odniesiona do różnicy tych temperatur:

$$\delta U_{nT} = \frac{U_{nT2} - U_{nT1}}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta U_{nT}}{\Delta T} \quad (9)$$

Dryft długoterminowy napięcia niezrównoważenia: różnica między wartościami napięcia niezrównoważenia wyznaczona dla dwu czasów t_2 i t_1 odniesiona do przedziału czasowego:

$$\delta U_{nt} = \frac{U_{nt2} - U_{nt1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta U_{nt}}{\Delta t} \quad (10)$$

Dryft temperaturowy prądu polaryzacji: różnica między wartościami prądu polaryzacji I_{pT2} dla temperatury T_2 i I_{pT1} dla temperatury T_1 odniesiona do różnicy tych wartości temperatury:

$$\delta I_{pT} = \frac{I_{pT2} - I_{pT1}}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta I_{pT}}{\Delta T} \quad (11)$$

Dryft temperaturowy prądu niezrównoważenia: różnica między wartościami prądu niezrównoważenia I_{nT2} dla temperatury T_2 i I_{nT1} dla temperatury T_1 odniesiona do różnicy tych temperatur:

$$\delta I_{nT} = \frac{I_{nT2} - I_{nT1}}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta I_{nT}}{\Delta T} \quad (12)$$

Szybkość narastania sygnału wyjściowego: największa stromość wzrostu chwilowej wartości napięcia wyjściowego w czasie mierzona przy podaniu na wejście prostokątnego napięcia zmiennego:

$$SR = \max \left| \frac{dU_{wy}}{dt} \right| \quad (13)$$

Pasmo tłumienia 3 dB: częstotliwość przenoszonych przez wzmacniacz sinusoidalnego napięcia zmiennego, przy której występuje tłumienie wzmocnienia napięciowego k_U o 3 dB, parametr oznaczany jest zazwyczaj w literaturze angielskiej: *GB* (3dB)

Pasmo wzmocnienia jednostkowego: częstotliwość przenieszonego przez wzmacniacz sinusoidalnego napięcia zmiennego, przy której występuje tłumienie wzmocnienia napięciowego do wartości $k_U = 1$, co oznacza w mierze logarytmicznej $k_U \log = 0$ dB; parametr oznaczany jest zazwyczaj w literaturze angielskiej *GBWP*.

Schemat wzmacniacza

Omawiając schemat wzmacniacza (rys. 1) należy zwrócić uwagę, że układ ten można traktować jako układ liniowy przy spełnieniu następujących warunków: dla danych napięć zasilających – dodatniego U_{zd} oraz ujemnego U_{zu} – napięcie wspólne U_w mieści się w gwarantowanym zakresie napięć wejściowych, napięcie wyjściowe U_{wy} mieści się w gwarantowanym zakresie napięć wyjściowych oraz obciążenie prądowe wyjścia wzmacniacza nie przekracza wartości dopuszczalnej.

Współczesne wzmacniacze monolityczne są tak projektowane, że mają następujące właściwości:

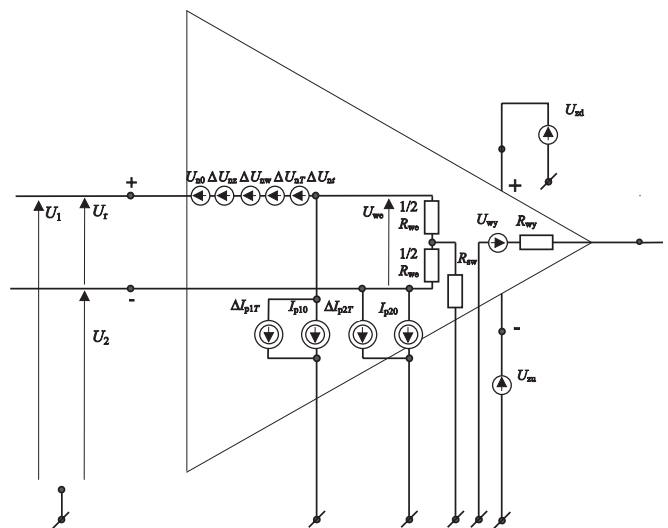
- poszczególne składowe źródła napięć niezrównoważenia U_{n0} , ΔU_{nz} , ..., ΔU_{nt} są bardzo małe w stosunku do przetwarzanych sygnałów napięciowych
- prądy polaryzacji I_{p1} i I_{p2} są bardzo małe w stosunku do przetwarzanych sygnałów prądowych

- rezystancje dla sygnału wspólnego R_{sw} oraz rezystancja wejściowa R_{we} są bardzo duże, a więc prądy w tych rezystancjach mogą być pomijane
- wzmocnienie napięciowe k_U ma bardzo dużą wartość, a napięcie wejściowe U_{we} ma bardzo małą wartość, zazwyczaj pomijalną.

Parametrem dominującym w układzie wzmacniacza, decydującym o jego pracy, jest sterowane źródło napięcia wyjściowego, którego wartość jest proporcjonalna do napięcia U_{we} , a współczynnikiem proporcjonalności jest wzmocnienie napięciowe (6) wg zależności:

$$U_{wy} = k_U U_{we} \quad (14)$$

Można założyć, że sygnał wyjściowy wzmacniacza U_{wy} przyjmuje wartości wynikające z parametrów obwodu zewnętrznego ujemnego sprzężenia zwrotnego i obwodu sterowania wzmacniacza. Jednak przy realizacji dokładnych elektronicznych układów pomiarowych i układów przetwarzania sygnałów, wyżej podane przybliżenie nie może być stosowane. Przy analizie układu należy uwzględnić poszczególne parametry wzmacniacza, które zostały odwzorowane: źródłami napięć, źródłami prądów oraz rezystancjami podanymi na schemacie.



Rys. 1. Schemat zastępczy wzmacniacza

Wielkości wpływające na parametry wzmacniacza

Następujące ważniejsze wielkości wpływają na parametry wzmacniacza: napięcie wspólne U_w , napięcie zasilania U_z , temperatura otoczenia T , upływ czasu t pracy wzmacniacza i wynikający z tego dryft długoterminowy. Wymienione wielkości mają wpływ na niektóre parametry wzmacniacza, a parametry te są reprezentowane przez odpowiednie źródła na schemacie.

Podane tam sumaryczne źródło napięcia niezrównoważenia U_n zawiera składowe uwzględnione w zależności:

$$U_n = U_{n0} + \Delta U_{nz} + \Delta U_{nw} + \Delta U_{nT} + \Delta U_{nt} \quad (15)$$

gdzie: ΔU_{nz} – zmiana napięcia niezrównoważenia wywołana zmianą napięcia zasilania ΔU_z określona zależnością (8a), ΔU_{nw} – zmiana napięcia niezrównoważenia wywołana zmianą napięcia wspólnego ΔU_{ws} określona zależnością (7a), ΔU_{nT} – zmiana napięcia niezrównoważenia wywołana zmianą temperatury otoczenia ΔT , określona zależnością (9), ΔU_{nt} – zmiana napięcia niezrównoważenia zaobserwowana przy pracy długotrwałej wzmacniacza dla przedziału czasowego Δt , określona zależnością (10), U_{n0} – początkowa wartość napięcia niezrównoważenia wzmacniacza w warunkach odniesienia, przy których pozostałe składowe mają wartości pomijalne.

Podobnie podane na rys. 1 źródła prądowe I_{p1} i I_{p2} prądów polaryzacji zawierają składowe określone zależnościami:

$$I_{p1} = I_{p10} + \Delta I_{p1T} \quad (16)$$

$$I_{p2} = I_{p20} + \Delta I_{p2T} \quad (17)$$

gdzie: ΔI_{p1T} oraz ΔI_{p2T} – zmiany odpowiednich prądów polaryzacji I_{p1} oraz I_{p2} wywołane zmianą temperatury otoczenia o ΔT , określone zależnością (11), a I_{p10} oraz I_{p20} – początkowe wartości prądów polaryzacji w warunkach odniesienia, przy których pozostałe składowe mają wartości pomijalne.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że według producentów wzmacniaczy inne potencjalne możliwe składowe zmian prądów polaryzacji są pomijalne i nie są specyfikowane.

Należy również zwrócić uwagę na to, że w niektórych układach wzmacniaczy błędy przetwarzania sygnałów są zależne bezpośrednio od zmian prądu niezrównoważenia I_n określonego wzorem (3) jako różnica prądów polaryzacji $I_n = I_{p1} - I_{p2}$.

Dla takich układów prąd niezrównoważenia wyrazić można wzorem:

$$I_n = I_{n0} + \Delta I_{nT} \quad (18)$$

gdzie: ΔI_{nT} – zmiana prądu niezrównoważenia wywołana zmianą temperatury otoczenia o ΔT określona zależnością (12), a I_{n0} – początkowa wartość prądu niezrównoważenia w warunkach odniesienia, przy których pozostałe składowe mają wartości pomijalne.

Należy tu odnotować fakt, że producenci wzmacniaczy monolitycznych nie specyfikują innych składowych zmian prądów niezrównoważenia wzmacniaczy.

Charakterystyczne grupy wzmacniaczy

Dla układów i systemów pomiarowych, ze względu na różne zastosowania, wyróżnić można dwie charakterystyczne grupy wzmacniaczy:

- wzmacniacze precyzyjne o małych dryftach parametrów wejściowych
- wzmacniacze precyzyjne o szczególnie małym poborze mocy zasilania.

Obydwie grupy wzmacniaczy zostaną opisane w drugiej części artykułu, która ukaże się w dalszym numerze PAR.

Bibliografia

1. Harasimowicz J.: *Przegląd monolitycznych wzmacniaczy operacyjnych*. Elektronika nr 11, 1972.
2. Korytkowski J.: *Wzmacniacze monolityczne i metoda analizy elektronicznych układów z tymi wzmacniaczami*. Wyd. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów. Warszawa 2000.
3. Reza Moghimi: *OP07 is still evolving*. AN-573 rev. A. Application Note. Analog Devices. 2003.
4. Korytkowski J.: *Cyfrowo sterowane symulatory rezystancji i konduktancji – przegląd, opisy działania, przykłady rozwiązań*. PAR nr 2/2008, Warszawa.
5. Fairchild Semiconductor: *FAN4174/FAN4274, Single and Dual, Ultra-Low Cost, Rail-to-Rail I/O, CMOS Amplifier*, May 2008, www.fairchildsemi.com/ds/FH%2FFAN4274.pdf.
6. Fairchild Semiconductor: *FHP3132, FHP3232, Single and Dual, High-Speed, Rail-to-Rail Amplifiers*. March 2007, www.fairchildsemi.com/ds/FH%2FFHP3132.pdf. ■