

Wzmacniacze pomiarowe w teorii i w praktyce, część 2

Wszędzie tam, gdzie zachodzi potrzeba wzmocnienia bardzo małych sygnałów, konieczne staje się stosowanie specjalnie do takich celów opracowanych rozwiązań układowych, pozwalających selektywnie wzmocnić sygnał użytkowy występujący w obecności dużych szumów i zakłóceń. W praktyce uzyskanie co najmniej zadawalających parametrów jest możliwe wyłącznie przy użyciu scalonych wzmacniaczy pomiarowych. W tej części artykułu zapoznamy Czytelników ze strukturami wzmacniaczy pomiarowych, jakie są stosowane w produkowanych układach scalonych.

Wzmacniacz pomiarowy – struktura 3-WO

Naturalną metodą poprawy asymetrii impedancji wejść wzmacniacza różnicowego jest zastosowanie dwu dodatkowych wzmacniaczy operacyjnych pracujących w konfiguracji wtórników napięciowych. Struktura wynikowego wzmacniacza pomiarowego z trzema wzmacniaczami operacyjnymi została pokazana na **rys. 8**. Stopień pierwszy (W1 i W2) stanowi złożenie dwóch wzmacniaczy nieodwracających, a stopień drugi (W3) jest wzmacniaczem różnicowym. W przypadku układu monolitycznego elementy zewnętrznej sieci rezystorów są integrowane ze wzmacniaczami operacyjnymi w jednej strukturze scalonej. Napięcie U'_{wy} (pomiędzy wyj-

ściami wzmacniacza W1 i W2) jest równe sumie spadków napięć na rezystorach $R1$ i $R2$

$$\begin{aligned} U'_{wy} &= U_{wer} + I_1 R_2 + I_1 R_2 = \\ &= U_{wer} + 2 \frac{U_{wer}}{R_1} R_2 = \\ &= U_{wer} \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

przy czym

$$U_{wer} = U_{we2} - U_{we1}$$

Stąd wzmocnienie napięciowe sygnału różnicowego stopnia I wynosi

$$G_{u1}^r = 1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \quad (27)$$

Wzmocnienie dla sygnału wspólnego tego stopnia wyznaczamy przykładając do obydwu wejść wzmacniacza ten sam sygnał $U_{we1} = U_{we2} = U_{wes}$ (podobnie jak na rys. 7). Spadek napięcia na rezystorze $R1$ jest wówczas równy zero, czyli prąd $I1$ nie płynie, nie powodując tym samym powstawania spadków napięć na rezystorach $R2$. Napięcia na wyjściach wzmacniaczy $W1$ i $W2$ są zatem sobie równe i równe także napięciu U_{wes} . Oznacza to, że wzmocnienie sygnału wspólnego tego stopnia wynosi

$$G_{u1}^s = 1 \quad (28)$$

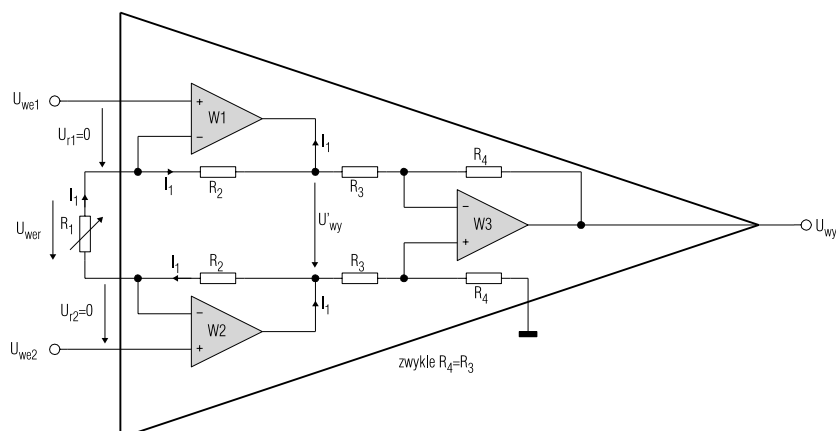
zatem wzmocnienie sygnału wspólnego całego wzmacniacza jest równe wzmocnieniu stopnia drugiego (ze wzmacniaczem W3) i jest określone zależnością (24).

Wzmocnienie sygnału różnicowego drugiego stopnia jest określone zależnością (17). Uwzględniając zmianę oznaczeń (por. rys. 5 i 8), wzmocnienie całego układu będące iloczynem wzmocnień obydwu stopni wynosi więc

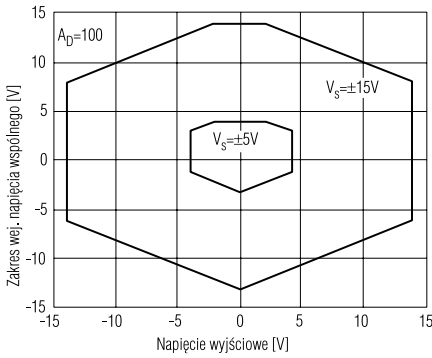
$$G_u^r = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3} \quad (29)$$

i zwykle jest regulowane poprzez zmianę wartości rezystora $R1$, który z reguły nie wchodzi w skład struktury scalonej.

Stopień pierwszy nie tłumi sygnału wspólnego (gdyż jego wzmocnienie dla tego sygnału wynosi jeden) i jest wykorzystywany tylko i wyłącznie do zapewnienia odpowiedniego wzmocnienia sygnału różnicowego. W efekcie wzmocnienie to może być teoretycznie dowolnie duże, co prowadzi do wzrostu współczynnika *CMR* – zależność (1). Tłumienie sygnału wspólnego jest realizowane w stopniu drugim (zgodnie z zależnością (24)) i zwykle stopień ten nie jest wykorzystywany do wzmacniania sygnału różni-



Rys. 8. Klasyczna struktura wzmacniacza pomiarowego typu 3-WO

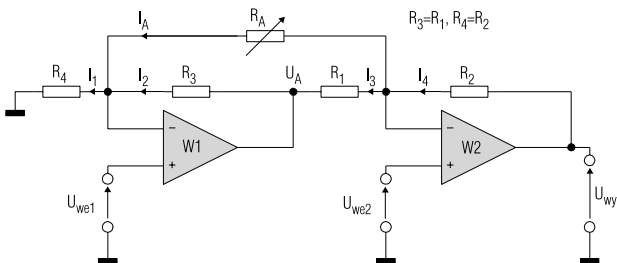


Rys. 9. Dopuszczalne wartości sygnału wspólnego przy ustalonej odpowiedzi scalonego wzmacniacza pomiarowego AD8221

cowego. Wówczas przyjmuje się, że $R_4=R_3$, wtedy wzmocnienie tego stopnia dla sygnału różnicowego wynosi jeden. Wartość wzmocnienia różnicowego w praktyce nie może być oczywiście dowolnie duża, gdyż może to ograniczyć zakres dopuszczalnych wartości sygnałów wspólnych. Wynika to z faktu, że po wzmocnieniu sygnału różnicowego oraz przeniesieniu sygnału wspólnego, odpowiedź każdego ze wzmacniaczy sekcji wejściowej nie może przekraczać dopuszczalnej granicy wynikającej z poziomu napięcia zasilania. Tym samym również ograniczanie napięcia zasilania prowadzi do zmniejszenia dopuszczalnego zakresu napięć wspólnych. Przykładowy wykres zależności zakresu wejściowego napięcia wspólnego w funkcji napięcia wyjściowego U_{wy} (a więc po operacji odejmowania w sekcji wyjściowej) przy zasilaniu $\pm 5\text{ V}$ i $\pm 15\text{ V}$ dla wzmacniacza pomiarowego AD8221 jest przedstawiony na rys. 9.

Wzmacniacz pomiarowy – struktura 2-WO

Drugą stosowaną w praktyce strukturą wzmacniacza pomiarowego, charakteryzującą się niższymi kosztami oraz mniejszym poborem mocy jest konstrukcja oparta na



Rys. 10. Wzmacniacz pomiarowy z dwoma wzmacniaczami operacyjnymi (struktura 2-WO)

dwu wzmacniaczach operacyjnych (rys. 10). W strukturze tej rolę wzmacniacza różnicowego pełni wzmacniacz W2, z którego w porównaniu z rozwiązaniem klasycznym przedstawionym na rys. 5 usunięto, celem uzyskania dużej impedancji wejścia nieodwracającego, dzielnik napięcia pierwotnie zrównujący wzmocnienia obu wejść różnicowych. Wzmacniacz ten spełnia swoją funkcję, tzn. wzmacnia sygnał różnicowy przy jednoczesnym tłumieniu sygnału wspólnego tylko wtedy, gdy zachodzi proporcja

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \quad (30)$$

Zakładając, że $R_3=R_1$ i $R_4=R_2$ oraz korzystając z praw Kirchhoffa i Ohma otrzymujemy

$$U_{wy} = U_{we2} + I_4 R_2 \quad (31)$$

gdzie

$$I_4 = I_3 + I_A = \frac{U_{we2} - U_A}{R_1} + \frac{U_{we2} - U_{we1}}{R_A} \quad (32)$$

Jednocześnie zachodzi

$$U_A = U_{we1} + I_2 R_1 \quad (33)$$

oraz

$$I_2 = I_1 - I_A = \frac{U_{we1}}{R_2} - \frac{U_{we2} - U_{we1}}{R_A} \quad (34)$$

Dokonując odpowiednich przekształceń uzyskujemy zależność opisującą wartość napięcia wyjściowego

$$U_{wy} = \left(U_{we2} - U_{we1} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{2R_2}{R_A} \right) \quad (35)$$

zatem wzmocnienie napięciowe sygnału różnicowego wynosi

$$G_u^r = \frac{U_{wy}}{U_{we2} - U_{we1}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{2R_2}{R_A} \quad (36)$$

W praktyce wartości rezystancji rezystorów R_1 i R_2 są ustalone (zwykle $R_2 \geq 4 \cdot R_1$), a wzmocnienie układu jest regulowane poprzez dobór wartości rezystancji R_A , która nie wchodzi w skład struktury scalonej wersji monolitycznej wzmacniacza pomiarowego.

Wzmocnienie sygnału wspólnego

wyznacza się korzystając ze sposobu sterowania wzmacniacza różnicowego pokazanego na rys. 7. Przy takim sterowaniu potencjał na obydwu końcówkach rezystora R_A jest taki sam, zatem prąd $I_A=0$, czyli rezystor ten nie ma wpływu na wartość wzmocnienia sygnału wspólnego. Wartość napięcia wyjściowego wynosi więc

$$U_{wy} = U_{wes} + I_4 R_2 \quad (37)$$

Jednocześnie, ponieważ $I_A=0$, to zachodzi następująca równość prądów

$$I_4 = I_3 = \frac{U_{wes} - U_A}{R_1} \quad (38)$$

a zatem

$$U_{wy} = U_{wes} + (U_{wes} - U_A) \frac{R_2}{R_1} \quad (39)$$

Napięcie U_A jest równe

$$U_A = U_{wes} + I_2 R_3 = U_{wes} + \frac{U_{wes}}{R_4} R_3 \quad (40)$$

W efekcie otrzymujemy

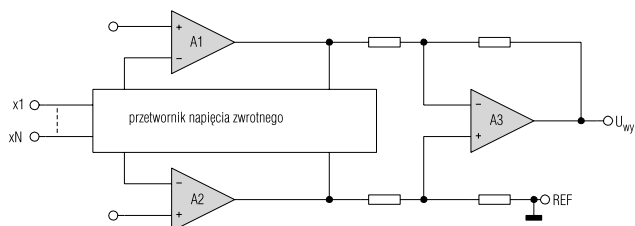
$$U_{wy} = U_{wes} + \left[U_{wes} - \left(U_{wes} + U_{wes} \frac{R_3}{R_4} \right) \right] \frac{R_2}{R_1} \quad (41)$$

i ostatecznie zależność na wzmocnienie sygnału wspólnego przyjmuje postać

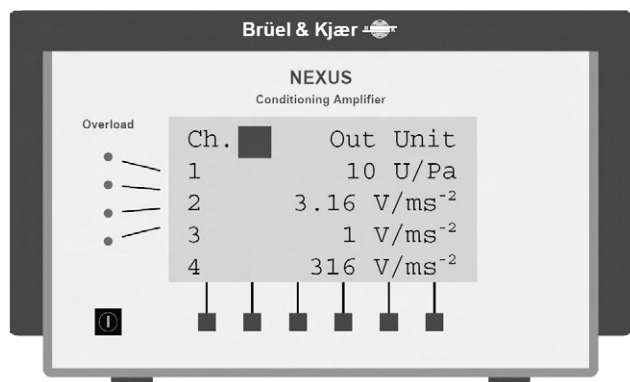
$$G_u^s = \frac{U_{wy}}{U_{wes}} = 1 - \frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (42)$$

Widać zatem, że sygnał wspólny jest nieskończenie tłumiony (przy założeniu idealnych parametrów WO), gdy zachodzi proporcja (30).

Podstawową wadą omawianego rozwiązania jest gorsze, w porównaniu ze wzmacniaczem 3-WO, tłumienie zmiennych sygnałów wspólnych spowodowane brakiem równości czasów propagacji sygnałów podanych na oba wejścia. Sygnał podany na wejście WE1 musi bowiem najpierw przejść przez wzmacniacz W1 zanim zostanie odjęty przez wzmacniacz W2 od sygnału podanego na wejście WE2. Sygnał na wyjściu W1 jest więc nieznacznie opóźniony (przesunięty w fazie) względem sygnału podanego na wejście WE2. Dodatkowo układ charakteryzuje się zawężeniem dopuszczalnego zakresu napięć wspólnych wraz ze zmniejszeniem wypadkowego wzmocnienia (przy wzmocnieniu równym 1 wzmacniacz



Rys. 11. Typowa struktura programowalnego wzmacniacza pomiarowego



Rys. 12. Widok płyty czołowej wzmacniacza kondycjonującego typu NEXUS™

ten traci w ogóle możliwość tłumienia sygnału wspólnego). Oznaczając przez x stosunek $R2/R1$ otrzymuje się, że wzmocnienie różnicowe przy $R_A = \infty$ jest na podstawie (36) równe

$$G_u' = 1 + x \quad (43)$$

Jednocześnie na podstawie (12) wzmocnienie wzmacniacza W1 można opisać zależnością

$$G_{uf1} = 1 + \frac{1}{x} \quad (44)$$

Oznacza to, że przy małych x , jego napięcie wyjściowe nawet przy niskich poziomach napięć wejściowych może osiągać maksima wyznaczone przez wartość napięcia zasilania. Dlatego zazwyczaj ([3], [6]) minimalne wzmocnienie różnicowe (36) jest nie mniejsze od 5. Cechą pozytywną konstrukcji 2-WO jest za to opcjonalna możliwość wykorzystania pełnego zakresu napięcia zasilania – tzw. praca *rail-to-rail* (co, w wolnym tłumaczeniu brzmi: „od szyny do szyny”), warunkowana przenoszeniem sygnału przez wzmacniacz W1 z małym, a więc nie powodującym wejścia w nasycenie, wzmocnieniem. Usunięcie za pomocą W2 sygnału wspólnego i odpowiednie wzmocnienie sygnału różnicowego umożliwia wówczas pełne wykorzystanie napięcia zasilania (tzn. od $+VS$ do $-VS$), co jest szczególnie istotne w przypadku urządzeń przenośnych zasilanych bateryj-

nie. Określenie warunków współpracy pomiędzy wzmacniaczem pomiarowym, a zazwyczaj po nim następującym przetwornikiem A/C sprowadza się wówczas do przyjęcia napięcia zasilania układu pierwszego równego zakresowi przetwarzania układu drugiego. W konstrukcji 3-WO wzmocnienie sygnału różnicowego następuje już w sekcji wejściowej i na skutek przenoszenia również sygnału wspólnego nie może ono na jej wyjściu zapewnić sygnałowi użytecznemu pełnego wykorzystania zakresu napięcia zasilania.

Wzmacniacze kondycjonujące

Oprócz omówionych powyżej struktur scalonych (lub też dyskretnych, konstruowanych na bazie wzmacniaczy operacyjnych) na rynku dostępne są również gotowe rozwiązania komercyjne wykonywane jako urządzenia w pełni programowalne, zwane też wzmacniaczami kondycjonującymi lub wprost kondycjonerami. Regulacja podstawowego parametru – wzmocnienia – odbywa się w nich z wykorzystaniem układu sterującego, który za pomocą kluczy półprzewodnikowych sterowanych wejściami cyfrowymi $x1, x2, \dots, xN$ zmienia wartości rezystancji sprężen zwrotnych (rys. 11). Oprócz sterowania ręcznego, często dostępnym rozwiązaniem jest sterowanie zdalne, możliwe za pośrednictwem jednego ze standardowych interfejsów. Wzmacniacze te często występują w konfiguracji modułowej, zestawianej opcjonalnie przez użytkownika. Przykładem wzmacniaczy tego typu są układy B&K typu NEXUS™ serii 269x przeznaczone do zastosowań wibroakustycznych (rys. 12). W zależności od potrzeb, w ramach zunifikowanego sposobu regulacji parametrów oraz wspólnej obudowy, możliwe jest wykorzystanie do czterech modułów wzmacniających przeznaczonych do współpracy z mikrofonami, przetwornikami ładunkowymi i przetwornikami napięciowymi wraz z możliwością zasilania prze-

wodem sygnałowym przetworników wymagających polaryzacji lub przetworników inteligentnych. Z uwagi na specyfikę zastosowań, rozwiązania te mogą być wyposażone w opcjonalne filtry o regulowanych charakterystykach oraz układy integratorów służące do wypracowania z sygnałów proporcjonalnych do przyspieszenia również sygnałów proporcjonalnych do prędkości i przemieszczenia drgającego obiektu. Parametry wybierane za pomocą klawiszy programowalnych, umieszczonych na panelu wejściowym z wyświetlaczem LCD, są również możliwe do regulacji zdalnie za pomocą portu szeregowego RS232 oraz oprogramowania dedykowanego lub ogólnego przeznaczenia. Wyświetlacz LCD może pracować w dwu trybach. Pierwszy to tryb wskaźnikowy, tzw. *Peak-Meter Bar Graph Display*, do którego dostęp możliwy jest z wielu poziomów menu za pomocą klawisza programowalnego symbolizującego wykres słupkowy, i którego zadaniem jest wizualna prezentacja bieżącego poziomu sygnału wyjściowego oraz wartości maksymalnych. Tryb drugi to tryb menu głównego *Main Set-up*, z poziomu którego przechodzi się do wszystkich dostępnych regulacji.

W zakresie sterowania zdalnego, za pomocą pojedynczego PC możliwy jest dostęp do 99 wzmacniaczy NEXUS pracujących jako urządzenia DTE. Każdy z nich jest wyposażony w dwa łącza o nazwach RS-232Host i RS-232NextUnit umożliwiające powstanie systemu o konfiguracji łańcuchowej, w którym możliwa jest komunikacja w pełni dwukierunkowa. Interfejs szeregowy posiada ustalionalną szybkość transmisji danych oraz możliwość włączenia/wyłączenia opcji „Echo”, dzięki której każdy odebrany przez wzmacniacz znak może być, w celu kontroli transmisji, natychmiast zwrócony do jednostki sterującej. Zbiór komunikatów interfejsowych wysyłanych do wzmacniacza w postaci zapytań oraz komend ma charakter hierarchiczny i jest określony standardem ANSI/IEEE Std.488.2 (1987) „IEEE Standard Codes, Formats, Protocols and Common Commands”.

Jacek Jakubowski

Jacek.Jakubowski@

wel.wat.edu.pl

Andrzej Dobrowolski

ADobrowolski@wat.edu.pl

Piotr Komur

PKomur@wat.edu.pl