

Wzmacniacz różnicowy — podejście wielkosygnałowe

7

1. Wstęp

Ćwiczenie umożliwia pomiar podstawowych parametrów wielkosygnałowych wzmacniacza różnicowego wykonanego na tranzystorach bipolarnych. Układ umożliwia zmianę konfiguracji pary różnicowej. Za pomocą przełączników można wybrać jeden z wariantów źródła prądowego polaryzującego tranzystory, jak również rodzaj obciążenia tranzystorów.

Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy zapoznać się z teorią dotyczącą zasady działania wzmacniacza różnicowego (zamieszczona jest ona w niniejszym opracowaniu).

2. Pomiary

Należy wykonać pomiary wzmacniacza różnicowego pracującego w następujących konfiguracjach:

- źródło prądowe — rezystor R_E , obciążenie — rezystor R_C lub R'_C ;
- źródło prądowe — rezystor R_E , obciążenie — R_D ;
- źródło prądowe — tranzystor z rezystorem R_{E1} lub R_{E2} , obciążenie — rezystor R_C lub R'_C ;
- źródło prądowe — tranzystor z rezystorem R_{E1} lub R_{E2} , obciążenie — R_D ;

Dla każdej konfiguracji A-D należy wykonać pomiary charakterystyk statycznych przy pobudzeniu:

- sygnałem różnicowym
- sygnałem wspólnym.

W pierwszym przypadku należy zmierzyć wartości napięć na kolektorach tranzystorów T_1 i T_2 (V_{WY1} , V_{WY2}) w funkcji wejściowego napięcia różnicowego V_{WER} (przełącznik $K1$ w pozycji wciśniętej). Ponadto dla tych samych wartości napięcia wejściowego należy zmierzyć prąd I_E (prawy wskaźnik). Wejściowe napięcie należy zmieniać za pomocą potencjometru P_2 w zakresie $[-150\text{mV}, +150\text{mV}]$ (wskazania lewego miernika należy przemnożyć przez 10 i przyjąć jednostkę mV).

W drugim przypadku dla sygnału wspólnego (sumacyjnego) należy zmierzyć wartość napięć na kolektorach tranzystorów T_1 i T_2 (V_{WY1} , V_{WY2}) w funkcji wejściowego napięcia wspólnego V_{WES} (przełącznik $K1$ w pozycji wyciągniętej). Ponadto dla tych samych wartości napięcia wejściowego należy zmierzyć wartości prądu I_E . Wejściowe napięcie należy zmieniać za pomocą potencjometru P_2 w zakresie $[-5\text{V}, +5\text{V}]$ (wskazania lewego miernika należy podzielić przez 2 i przyjąć jednostkę V).

PRZYKŁADY TABEL POMIAROWYCH

(tabele dla pobudzenia sygnałem różnicowym)

źródło prądowe.....	obciążenie				
V_{WER} [mV]	-150	-130		+130	+150
V_{WY1} [V]					
V_{WY2} [V]					
V_{WYR} [V]					
I_E [mA]					

(tabele dla pobudzenia sygnałem wspólnym)

źródło prądowe.....	obciążenie				
V_{WES} [V]	-5	-4		+4	+5
V_{WY1} [V]					
V_{WY2} [V]					
V_{WYR} [V]					
I_E [mA]					

UWAGA za każdym razem, gdy jest zmieniana konfiguracja A-D należy układ zrównoważyć. W tym celu należy wcisnąć przełącznik $K1$ i potencjometrem P_2 ustawić napięcie wejściowe równe 0mV. Dla takich warunków, należy za pomocą potencjometru P_3 „ZER” ustawić takie same wartości napięć na kolektorach tranzystorów T_1 i T_2 . Układu w konfiguracji zawierającej rezystor dynamiczny R_D nie da się zrównoważyć. Pomiary należy przeprowadzić dla środkowego położenia potencjometru P_3 „ZER”.

Wciśnięcie przełącznika oznaczonego: R_E , R_{E1} , R_{E2} , R_C , R'_C , R_D powoduje załączenie wybranej konfiguracji. Do poprawnego ustawienia konfiguracji całego układu należy wcisnąć jeden z przełączników R_E , R_{E1} , R_{E2} (kolor czarny) oraz jeden z przełączników R_C , R'_C , R_D (kolor biały).

3. Opracowanie wyników

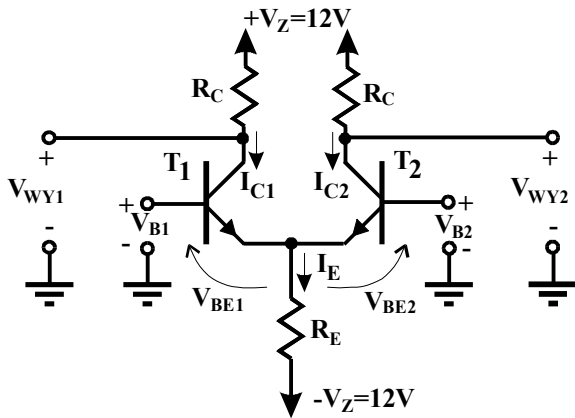
Wyniki pomiarów wzmacniacza różnicowego w konfiguracji A, B, C i D należy przedstawić na wykresach. Na wspólnych wykresach pokazać charakterystyki statyczne dla pobudzenia wspólnego i różnicowego dla czterech konfiguracji A-D. Dla przypadku pobudzenia sygnałem różnicowym narysować funkcje $V_{WYR} = V_{WYR}(V_{WER})$ (cztery krzywe na wykresie). W analogiczny sposób na oddzielnym wykresie pokazać funkcje $V_{WYR} = V_{WYR}(V_{WES})$ dla pobudzenia sygnałem wspólnym (cztery krzywe na wykresie). Kolejne dwa wykresy powinny przedstawiać wyniki pomiarów prądu I_E dla czterech konfiguracji A-D i dla dwóch sposobów pobudzenia. Na wspólnym wykresie pokazać funkcje $I_E = I_E(V_{WER})$ przy pobudzeniu różnicowym (cztery krzywe na wykresie) oraz na oddzielnym wykresie wspólnie funkcje $I_E = I_E(V_{WES})$ dla pobudzenia wspólnego (cztery krzywe na wykresie).

Na podstawie pomiarów obliczyć wartość wzmocnienia różnicowego K_r , wzmocnienia wspólnego K_s oraz wartość współczynnika CMRR.

Opierając się na schemacie wzmacniacza w konfiguracji A wyliczyć: punkty pracy tranzystorów T_1 oraz T_2 (I_{C1} , I_{C2} , V_{C1} , V_{C2}) oraz wartość prądu I_E , ponadto wyliczyć wartości wzmocnień K_r , K_s . Porównać wyniki pomiarów i obliczeń: punktów pracy tranzystorów, wzmocnień K_r oraz K_s dla wzmacniacza w konfiguracji A. Dla wzmacniacza w konfiguracji zawierającej źródło prądowe z tranzystorem T_3 , wyliczyć prąd I_E wynik ten porównać z danymi pomierzonymi.

4. Teoria

Uproszczony schemat wzmacniacza różnicowego (bez przełączników zmiany konfiguracji i potencjometrów regulacji napięć wejściowych) pokazano na rys. 1. Wzmacniacz różnicowy jest zbudowany z dwóch symetrycznych gałęzi zawierających tranzystory T_1 i T_2 .



Rys. 1. Uproszczony schemat wzmacniacza różnicowego.

Zasada działania wzmacniacza różnicowego może być wyjaśniona w następujący sposób. Jeżeli na bazę tranzystora T_1 zostanie podane dodatnie napięcie V_{B1} , zaś napięcie $V_{B1}=0$, to wtedy prąd kolektora I_{C1} tranzystora T_1 wzrośnie. Jednocześnie prąd kolektora I_{C2} tranzystora T_2 zmaleje. Sytuacja ulegnie odwróceniu, jeżeli polaryzacja napięć będzie przeciwna. We wzmacniaczu suma prądów emiterów tranzystorów jest równa prądowi I_E , który płynie przez rezystor R_E , a zatem:

$$I_{E1} + I_{E2} = I_E \quad (1)$$

Jeżeli wartość rezystancji R_E jest dostatecznie duża, to wartość prądu jest niezależna od wysterowania tranzystorów T_1 i T_2 . Znacznie korzystniejsze pod tym względem jest stosowanie źródła prądowego zamiast rezystora R_E . Korzystając z napięciowego prawa Kirchoffa można ułożyć równania:

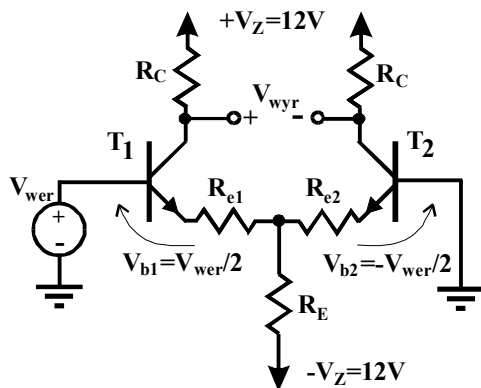
$$\begin{aligned} V_{BE1} &= V_{B1} - V_E \\ V_{BE2} &= V_{B2} - V_E \end{aligned} \quad (2)$$

Po eliminacji napięcia V_E z równań (2) można otrzymać:

$$V_{WER} = V_{B1} - V_{B2} = V_{BE1} - V_{BE2} \quad (3)$$

Napięcie V_{WER} stanowi różnicowe wysterowanie wzmacniacza. Ze wzoru (3) widać, że różnicowe napięcie wejściowe V_{WER} jest niezależne od wartości rezystora R_E . Z tego powodu wzmocnienie różnicowe K_r całego wzmacniacza nie zależy od wartości rezystora R_E .

Praca wzmacniacza różnicowego z wejściem asymetrycznym została przedstawiona na rys. 2.



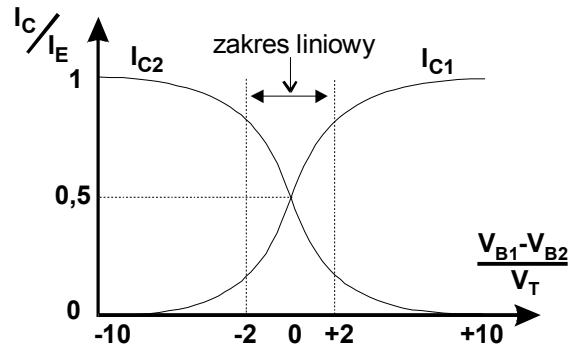
Rys. 2. Wzmacniacz różnicowy pracujący z asymetrycznym wejściem i symetrycznym wyjściem.

W układzie z rys. 2 tranzystor T_1 pracuje w konfiguracji wtórnika emiterowego. Z emitera tego tranzystora sygnał jest doprowadzany do tranzystora T_2 , który pracuje w konfiguracji wspólnej bazy. Dla dostatecznie dużej wartości rezystancji R_E chwilowe zmiany wartości prądów emiterów obu tranzystorów są sobie równe i przeciwnie skierowane. Stąd efektywne napięcia

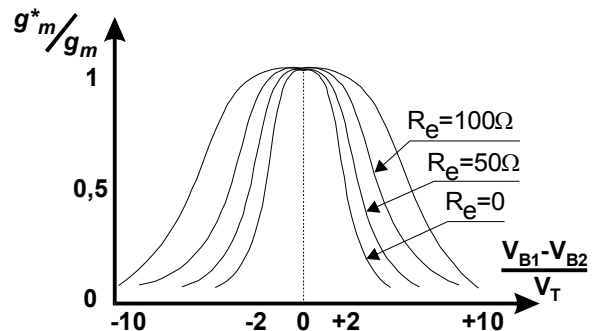
sterujące oba tranzystory są prawie jednakowe (dla idealnego źródła prądowego zamiast R_E i identycznych tranzystorów T_1 i T_2 napięcia są równe). Każde z tych napięć stanowi połowę napięcia sterującego V_{wer} . Wzmacniacz różnicowy posiada więc cechę samoczynnego symetryzowania wejściowego sygnału sterującego oba tranzystory. W efekcie wzmocnienie każdej z gałęzi wzmacniacza jest równe połowie wzmocnienia całego układu.

4.1. Zakres liniowej pracy wzmacniacza różnicowego

Na rys. 3 przedstawiono typową charakterystykę statyczną wzmacniacza różnicowego. Z wykresu można zauważyć, że istnieje zakres o względnie liniowym przebiegu. Charakterystyki przejściowe tranzystorów są liniowe w pobliżu spoczynkowego punktu pracy wzmacniacza, tj. punktu symetrii odpowiadającego sytuacji gdy $V_{B1} = V_{B2}$. Zakres względnie liniowej pracy wzmacniacza odpowiada różnicy napięć wejściowych wynoszących około 50mV. Zakres ten jest więc bardzo mały. Jeżeli zachodzi konieczność poszerzenia zakresu liniowego, można to zrobić włączając dodatkowe rezystory R_{e1} oraz R_{e2} pomiędzy emiterów tranzystorów, a punkt przyłączenia rezystora R_E (tak jak pokazano to na rys. 2). Działanie dodatkowych rezystorów polega na wprowadzeniu ujemnego sprzężenia zwrotnego, które poszerza zakres liniowości wypadkowej transkonduktancji wzmacniacza g_m^* . Wpływ wartości rezystancji $R_{e1}=R_{e2}$ na zakres liniowości wzmacniacza pokazano na rys. 4.



Rys. 3 Charakterystyka statyczna przenoszenia wzmacniacza różnicowego.



Rys. 4 Wpływ wartości rezystancji w emiterach tranzystorów na zakres liniowości transkonduktancji wzmacniacza g_m^* .

Jeżeli rezystancje spełniają warunek $R_{e1}=R_{e2}$, wówczas wartość transkonduktancji całego wzmacniacza dla wyjścia asymetrycznego wyraża się wzorem:

$$g_m^* = \frac{g_m}{2(1 + R_e g_m)} \quad (4)$$

gdzie $g_m = I_C / V_T$, $V_T = 25,8mV$.

4.2. Rola rezystora R_E we wzmacniaczu różnicowym

Dla jednakowych, w tej samej fazie sygnałów V_{B1} i V_{B2} (sygnał współbieżny), lub dla takich samych zmian parametrów tranzystorów (np. wywołanych zmianą temperatury otoczenia)

istnieje silne sprzężenie zwrotne na wspólnej rezystancji R_E . Sprzężenie to jest tym silniejsze im większą wartość rezystancji ma R_E . Z kolei przyysterowaniu wzmacniacza sygnałem różnicowym, zmiany prądów obu tranzystorów są przeciwne i redukują się na rezystancji R_E . Wobec tego, ujemne sprzężenie zwrotne nie obejmuje tej rezystancji i w efekcie, dla sygnału różnicowego wzmacnienie układu jest dużo większe w porównaniu ze wzmacnieniem dla sygnału wspólnego. Wzmacnienie różnicowe zależy jedynie od wartości rezystorów R_C oraz R_e , zaś wzmacnienie wspólne od wartości R_C , R_e oraz R_E , a mianowicie:

$$K_r = \frac{\Delta V_{WYR}}{\Delta V_{WER}} = -2R_C g_m^* \quad (5)$$

$$K_s = \frac{\Delta V_{WY1}}{\Delta V_{WES}} = -\frac{R_C g_m}{1 + (2R_E + R_e)g_m} \quad (6)$$

Wzór (5) został wyprowadzony w oparciu o wzór (4) podający transkonduktancję całego wzmacniacza różnicowego (wzmacnienie wzmacniacza jest równe iloczynowi transkonduktancji i rezystancji obciążenia R_C). Cyfra 2 wynika z faktu, że transkonduktancja (4) została podana dla konfiguracji asymetrycznego wyjścia. Środkowe składniki wzorów (5) i (6) podają metody obliczania wzmacnień przy wykorzystaniu danych pomiarowych.

4.3. Wspólneysterowanie wzmacniacza różnicowego

Z wspólnymysterowaniem wzmacniacza różnicowego ma się do czynienia gdy do obu wejść wzmacniacza są doprowadzone takie same sygnały napięciowe $V_{B1}=V_{B2}$. W tym przypadku napięcia sterujące tranzystory będą zmniejszone o wartość spadku napięcia na rezystancji R_E . Wzmacnienie sygnałów wspólnych jest więc silnie zależne od wartości rezystancji R_E . Jak można zauważyć ze wzoru (6) im większa jest wartość rezystancji R_E , tym mniejsze jest wzmacnienie wspólne układu. W praktyce wszelkie sygnały wspólne mają charakter zakłóceń, np. dryft cieplny powodujący zmianę punktów pracy tranzystorów T_1 i T_2 . Z kolei sygnał różnicowy niesie informacje użyteczne. Można więc stwierdzić, że idealny wzmacniacz różnicowy powinien mieć zerowe wzmacnienie wspólne.

4.4. Wylczenie punktów pracy tranzystorów

Opierając się na schemacie z rys. 2 można wylczyć punkty pracy tranzystorów T_1 i T_2 dla stanu spoczynkowego wzmacniacza. W przypadku brakuysterowania ($V_{wer} = 0$) obowiązują równania:

$$\begin{aligned} V_{BE1} + I_E R_E + I_{C1} R_{e1} &= V_z \\ I_{C1} &= I_E / 2 \end{aligned} \quad (7)$$

stąd:

$$I_E = \frac{V_z - V_{BE}}{R_E + R_{e1}/2}; \quad I_{C1} = I_{C2} = I_E / 2 \quad (8)$$

$$V_{C1} = V_{C2} = V_z - R_C I_E / 2$$

Wylczenie prądu I_E dla wzmacniacza z konfiguracji ze źródłem prądowym na tranzystorze T_3 przebiega inaczej. W oparciu o rys. 5 można ułożyć równania:

$$V_{B3} = -\frac{R_7}{R_7 + R_8} V_z; \quad I_E \cong I_{E3} = \frac{V_z + V_{B3} - V_{BE}}{R_{E1}} \quad (9)$$

Przyjąć $V_{BE} = 0,65$ V.

4.5. Współczynnik tłumienia sygnałów wspólnych — CMRR

Dążąc do ideału, wzmacniacze różnicowe projektuje się w taki sposób aby uzyskać jak najmniejsze wzmacnienie wspólne. Parametrem charakteryzującym relację między użytecznym

wzmacnieniem różnicowym, a szkodliwym wzmacnieniem wspólnym jest współczynnik CMRR (*ang. Common Mode Rejection Ratio*):

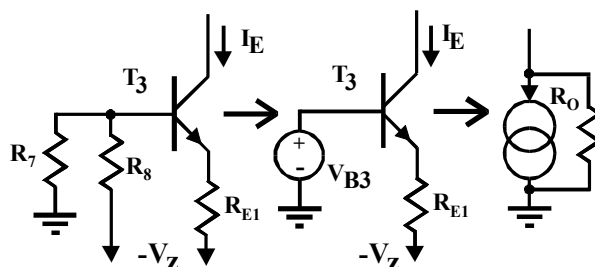
$$CMRR = \frac{K_r}{K_s} = \frac{\Delta V_{WYR} / \Delta V_{WER}}{\Delta V_{WY1} / \Delta V_{WES}} = \frac{\Delta V_{WES}}{\Delta V_{WER}} \quad (7)$$

Często w praktyce wygodnie jest określić CMRR, korzystając z ostatniego równania we wzorze (7). Definicja ta mówi, że CMRR jest ilorazem sumacyjnego napięcia wejściowego do różnicowego napięcia wejściowego, które wytwarza takie same napięcie różnicowe na wyjściu wzmacniacza.

W przypadku idealnej symetrii wzmacniacza różnicowego współczynnik CMRR jest równy nieskończoności. W rzeczywistym układzie jednak współczynnik CMRR ma skończoną wartość, która wzrasta ze wzrostem wartości rezystancji R_E . W związku z tym w celu uzyskania jak najlepszego CMRR wymaga się, aby rezystor R_E miał możliwie jak największą wartość oraz aby oba użyte tranzystory miały identyczne parametry, szczególnie chodzi tu o wartość współczynnika wzmacnienia prądowego β .

4.6. Układ prądowego zasilania emiterów

Jak już zostało powiedziane wcześniej, możliwe jest uzyskanie dobrych parametrów wzmacniacza różnicowego pod warunkiem zapewnienia dużej wartości rezystancji R_E . Zwiększanie wartości tego rezystora jest w praktyce ograniczone warunkami zasilania. Możliwe jest jednak zastosowanie źródła prądowego w miejsce rezystora. Najprostszym źródłem prądowym jest pojedynczy tranzystor w konfiguracji pokazanej na rys. 5.



Rys. 5. Przykład źródła prądowego zrealizowanego na pojedynczym tranzystorze.

Typowo wartość rezystancji wyjściowej R_O źródła pokazanego na rys. 5 jest równa kilka-kilkanaście MΩ.

5. Dane elementów w układzie

$R_1=110\Omega$	$R_5=820\Omega$	$R_C=12k\Omega$
$R_2=110\Omega$	$R_6=820\Omega$	$R'_C=2k\Omega$
$R_3=8,2k\Omega$	$R_7=2k\Omega$	$R_E=12k\Omega$
$R_4=8,2k\Omega$	$R_8=910\Omega$	$R_{E1}=3,13k\Omega$
$R_{E2}=6,36k\Omega$	$R_P=490\Omega$	$R_W=4,9k\Omega$
$R_{SD0}=5,18k\Omega$	$P_1=2,2k\Omega$	
$P_2=10k\Omega$	$P_3\text{"ZER"}=470\Omega$	$R_{e1}=R_{e2}=P_3\text{"ZER"}/2$

Literatura:

- [1] Z. J. Staszak, J. Glinianowicz, D. Czarnecki "Materiały pomocnicze do przedmiotu Układy Elektroniczne Liniowe".
- [2] A. Guziński, "Liniowe elektroniczne układy analogowe" WNT 1992.
- [3] S. Soclof, "Zastosowania analogowych układów scalonych", WKŁ 1991.