Kaskoda 12

ćwiczenie opracował Grzegorz Blakiewicz

1. Wstęp

Celem ćwiczenia jest zaprojektowanie i praktyczna weryfikacja poprawności projektu kilku wariantów wzmacniacza kaskodowego. We wstępnej fazie ćwiczenia należy, w oparciu o podane wzory projektowe, wyliczyć wartości parametrów elementów kaskody tak, aby uzyskać wzmacniacz o z góry zadanych właściwościach, tzn.: wzmocnieniu, dolnej częstotliwości 3dB, itp. Kolejną fazą ćwiczenia jest ustawienie wyliczonych wartości elementów w rzeczywistym układzie i pomiar jego parametrów. Rozpatrywany w ćwiczeniu układ umożliwia zmiany wartości wybranych elementów, przez co możliwe jest ustawienie wszystkich parametrów układu na podstawie wcześniejszych obliczeń teoretycznych. Na wejściu i wyjściu kaskody dodano bufor o wzmocnieniu równym 1 po to, aby uniezależnić wyniki pomiarów od przyrządów takich jak generator sygnału czy woltomierz oraz od użytych kabli łączących.

Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy zapoznać się z teorią dotyczącą pracy tranzystora bipolarnego jako wzmacniacza liniowego (zamieszczona jest ona w niniejszym opracowaniu). Prowadzący ma obowiązek sprawdzić przygotowanie do ćwiczenia.

Aby usprawnić dokonywanie pomiarów należy wykonać wszystkie obliczenia teoretycznych w domu.

Na zajęciach wprowadzających każda grupa laboratoryjna otrzymuje swój numer. Numer ten określa jednocześnie pozycję w każdej z tabel podających dane do zadania projektowego. Należy wybrać tylko jeden zestaw danych z każdej tabeli i zaprojektować kaskodę o zadanych parametrach.

2. Zadania projektowe i pomiary

2.1. Parametry w środku pasma

Dla wszystkich obliczeń w tym punkcie przyjąć, że kondensatory stanowią zwarcie. W układzie pomiarowym ustawić: $C_{C1}=C_{C2}=47\mu F$, $C_E=470\mu F$, częstotliwość generatora sygnału 5-15kHz.

2.1.1. Dobór wartości rezystancji R_C

Zadanie: Wyliczyć wartości elementów R_1-R_3, R_{E1} w taki sposób, aby prąd emiterów obu tranzystorów wynosił 1mA. Dobrać wartość rezystancji R_C tak, aby uzyskać wartości wzmocnienia v_o/v_s takie jak podano w tabeli poniżej.

Nr	v_o/v_s	R_L, kΩ
1	60	10
2	48	10
3	35	10
4	29	10
5	27	10
6	25	10
7	32	5
8	28	5
9	23	5
10	18	5
11	8	0.5
12	4	0.5

dla $R_S=2k\Omega$ $R_{E2}=0$.

Pomiar: Wykonać pomiary wzmocnienia układu. oraz maksymalnej amplitudy sygnału wyjściowego V_{omax}. Należy podać na wejście układu przebieg sinusoidalny. Zwiększając amplitudę sygnału wejściowego zaobserwować moment, począwszy od którego przebieg na oscyloskopie zaczyna być wyraźnie zniekształcony.

2.1.2. Dobór wartości rezystancji R_{E2}

Zadanie: Wyliczyć wartości elementów R_1-R_3, R_{E1}, R_{E2} w taki sposób, aby prąd emiterów obu tranzystorów wynosił 1mA. Jednocześnie dobrać wartość rezystancji R_{E2} tak, aby uzyskać wzmocnienia v_o/v_s takie jak podano w tabeli poniżej.

Nr	v_o/v_s	R_L, kΩ	R_C, kΩ
1	17	10	5
2	15	10	5
3	11	10	5
4	8	10	5
5	6	10	5
6	4	10	5
7	12	5	5
8	10	5	5
9	8	5	5
10	6	5	5
11	4	5	5
12	1.5	5	5

dla $R_S=2k\Omega$.

Pomiar: Wykonać pomiary wzmocnienia układu oraz maksymalnej amplitudy sygnału wyjściowego V_{omax} (patrz punkt 2.1.1).

2.1.3. Dobór wartości prądu kolektora tranzystorów

Zadanie: Wyliczyć minimalne wartości prądów kolektorów tranzystorów (dobierając odpowiednie wartości rezystancji R_1-R_3, R_{E1}, R_{E2}=0) w taki sposób, aby uzyskać maksymalną amplitudę sygnału wyjściowego taką jak podano w tabeli

Nr	$V_{omax}\geq$, V	R_L, kΩ
1	3.5	10
2	3	10
3	2	10
4	3	5
5	2	5
6	1.5	5
7	1.5	0.5
8	1	0.5
9	0.8	0.5
10	0.6	0.1
11	0.5	0.1
12	0.4	0.1

Pomiar: Wykonać pomiary maksymalnej amplitudy sygnału wyjściowego według metody podanej w punkcie 2.1.1.

2.1.4. Projekt kaskody

Zadanie: Zaprojektować wzmacniacz, wyliczając potrzebne wartości rezystancji i pojemności, tak aby uzyskać parametry podane w tabeli.

Nr	v_o/v_s	$V_{omax}\geq$, V	R_L, kΩ	R_S, kΩ	$f_{I3dB}\geq$
1	50	2	10	2	20
2	43	2	10	2	30
3	35	1.5	10	0	30
4	45	2	5	2	40
5	38	1	5	2	25
6	27	1	5	0	35
7	10	0.8	0.5	2	50
8	12	0.5	0.5	2	60
9	7	0.5	0.5	0	45
10	5	0.4	0.1	2	25
11	7	0.4	0.1	0	50
12	3	0.3	0.1	2	60

gdzie: f_{I3dB} częstotliwość graniczna 3dB. Wartości pojemności powinny być możliwie jak najmniejsze, jednak na tyle duże, aby spełnić wymóg na wartość f_{I3dB}.

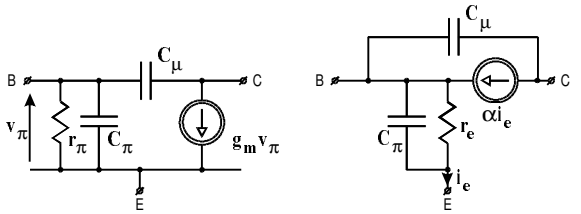
Pomiar: Pomierzyć wzmocnienie w środku pasma v_o/v_s, maksymalna amplitudę napięcia wyjściowego V_{omax}, dolne częstotliwości 3dB.

3. Opracowanie wyników

Dla każdego z punktów od 2.1.1 do 2.1.4 przedstawić obliczenia teoretyczne dotyczące wyznaczania: punktów pracy tranzystorów, wzmocnienia w środku pasma. Podać obliczenia związane z określeniem dolnych częstotliwości 3dB. Należy zamieścić: dokładny wykaz wartości elementów, pomierzonych punktów pracy tranzystorów (napięcia i prądy) oraz modele małosygnałowe całego układu. Wyliczyć teoretycznie maksymalne wartości amplitudy napięcia wyjściowego i porównać je z wynikami pomiarów. Na końcu opracowania dotyczącego każdego z punktów należy zrobić zestawienie wyników teoretycznych i wyników uzyskanych z pomiarów.

4. Teoria

Punkty pracy tranzystorów należy wyznaczyć przy założeniu, że prąd stały bazy I_B jest pomijalnie mały. Aby możliwe było pominięcie w obliczeniach prądów polaryzacji baz tranzystorów należy założyć, że wartość prądu płynącego przez rezystory R_1-R_3 jest co najmniej 10 razy większa od wartości prądów baz tranzystorów. Parametry tranzystorów: **β=140, V_{BE}=- 0.65V, V_T=25mV** (UWAGA tranzystory w ćwiczeniu są typu pnp!).



Rys. 1 Modele małosygnałowe tranzystora bipolarnego

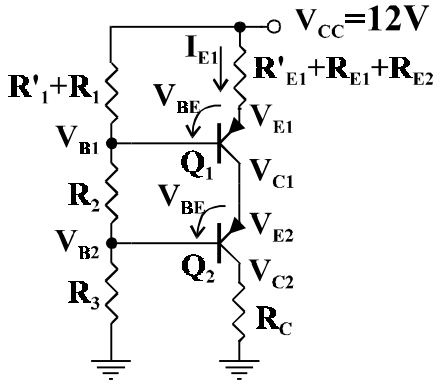
Parametry modelu małosygnałowego: $g_m = \frac{I_C}{V_T}$, $r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$,

$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$, $r_e = \frac{r_\pi}{\beta+1}$

Rozpatrywana w ćwiczeniu kaskoda jest wzmacniaczem w konfiguracji (CE-CB).

4.1 Punkt pracy

(zaniedbano prąd baz tranzystorów)



Rys. 2 Schemat układu kaskody służący do wyliczenie punktów pracy tranzystorów

$$V_{B1} = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_1 + R_2 + R_3} V_{CC} \quad (1)$$

$$V_{CC} = 12V \quad (2)$$

$$I_{C2} \approx I_{C1} \approx I_{E2} \approx I_{E1} = \frac{V_{CC} - V_{B1} + V_{BE}}{R'_{E1} + R_{E1} + R_{E2}} \quad (3)$$

$$V_{BE} = -0.65V \quad (4)$$

$$V_{B2} = \frac{R_3}{R_1 + R_1 + R_2 + R_3} V_{CC} \quad (5)$$

$$V_{E1} = V_{B1} - V_{BE} \quad (6)$$

$$V_{C1} = V_{E2} = V_{B2} - V_{BE} \quad (7)$$

$$V_{C2} = I_{C2} R_C \quad (8)$$

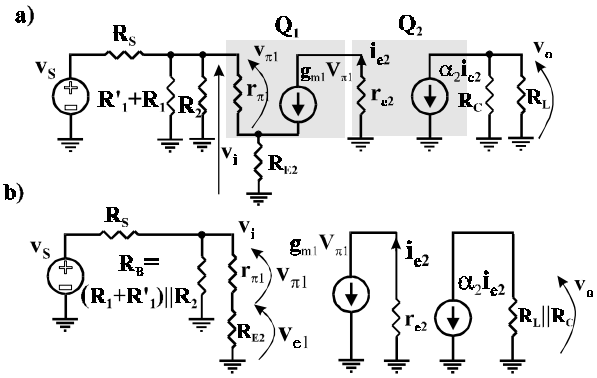
$$V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} \quad (9)$$

$$V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} \quad (10)$$

4.2 Analiza małosygnałowa:

środek pasma:

Zastępczy schemat małosygnałowy z zakresie średnich częstotliwości (w paśmie przepustowym) jest tworzony przy założeniu, że pojemności sprzęgające i bocznikujące stanowią zwarcie dla sygnałów zmiennych, natomiast pojemności pasożytnicze tranzystora są rozwarciem. Napięcie zasilania, ponieważ ma stały potencjał, jest również traktowane jako masa.



Rys. 3 Schemat małosygnałowy kaskody dla środka pasma a) - schemat pełny; b) - schemat uproszczony.

$$R_B = (R_1 + R_1') \| R_2 \quad (11)$$

$$v_{e1} = R_{E2}\left(i_{b1} + \beta\, i_{b1}\right) = R_{E2}\left(1+\beta\right) i_{b1} \quad (12)$$

$$R_x = \frac{v_{e1}}{i_{b1}} = R_{E2}\left(\beta + 1\right) \quad (13)$$

$$v_i = \frac{R_B \| \left(r_{\pi 1} + R_x\right)}{R_B \| \left(r_{\pi 1} + R_x\right) + R_S} v_s \quad (14)$$

$$v_{\pi 1} = \frac{r_{\pi 1}}{r_{\pi 1} + R_x} v_i \quad (15)$$

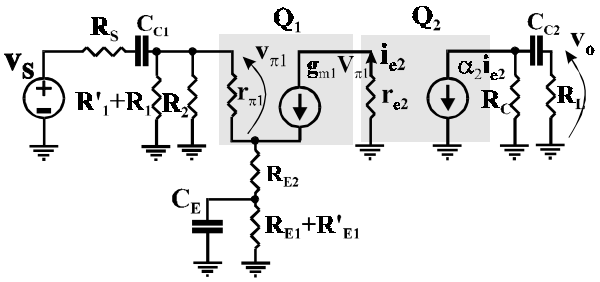
$$i_{e2} = g_{m1} v_{o1} \quad (16)$$

$$v_o = -\alpha_2 \left(R_C \| R_L\right) i_{e2} \quad (17)$$

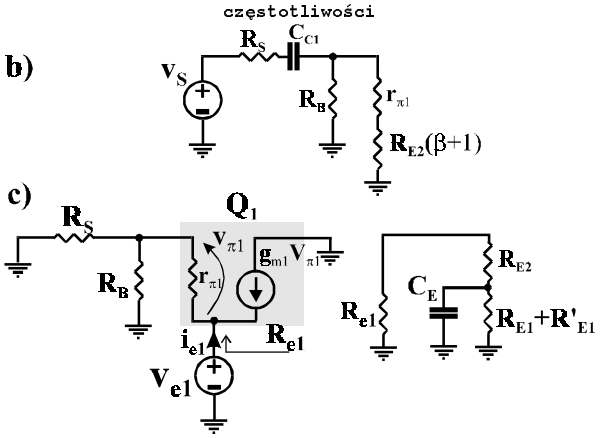
$$\boxed{\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_B \| \left(r_{\pi 1} + R_x\right)}{R_B \| \left(r_{\pi 1} + R_x\right) + R_S} \frac{r_{\pi 1}}{r_{\pi 1} + R_x} g_{m1} \alpha_2 \left(R_C \| R_L\right)} \quad (18)$$

niskie częstotliwości:

Częstotliwość graniczna dolna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami sprzęgającymi lub bocznikującymi (licząc stałe czasowe dla każdej z pojemności, pozostałe należy traktować jako zwarcie). Pojemności pasożytnicze traktuje się jako rozwarcia.



Rys. 4a) Pełny model kaskody dla niskich częstotliwości



Rys.4 b) schemat do obliczenia stałej czasowej τ_{L1}; b) schemat do obliczenia stałej czasowej τ_{L2}

$$\tau_{I1} = C_{C1}\left[R_S + R_B \left\| \left(r_{\pi 1} + R_{E2}(\beta+1)\right)\right.\right] \quad (19)$$

$$i_{e1} = -\left(i_{b1} + \beta\, i_{b1}\right) = -i_{b1}(\beta+1) \quad (20)$$

$$i_{b1} = -\frac{v_{e1}}{r_{\pi 1} + R_S \| R_B} \quad (21)$$

$$R_{e1} = \frac{v_{e1}}{i_{e1}} = \frac{r_{\pi 1} + R_S \| R_B}{\beta+1} \quad (22)$$

$$\tau_{I2} = C_E\left[\left(R_{e1} + R_{E2}\right) \left\| \left(R_{E1} + R_{E1}'\right)\right.\right] \quad (23)$$

$$\tau_{I3} = C_{C2}\left(R_C + R_L\right) \quad (24)$$

$$f_{L3dB} = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{I1}} + \frac{1}{\tau_{I2}} + \frac{1}{\tau_{I3}}\right) \quad (25)$$

dobór parametrów ze względu na osiągnięcie założonej dynamiki sygnału

W układach elektronicznych istnieją dwie główne przyczyny ograniczające dynamikę sygnału: a) ograniczony zakres zmian napięcia; b) ograniczona wydajność prądowa.

a) ograniczenia zakresu zmian napięcia

W celu zapewnienia względnie liniowej pracy układu, każdy z tranzystorów powinien pracować w stanie polaryzacji normalnej dla całego zakresu zmian napięć. Polaryzacja normalna tranzystora występuje wtedy, gdy złącze BE jest w stanie przewodzenia ($V_{BE} \le -0{,}65\mathrm{V}$ -dla tranzystora pnp), zaś złącze BC jest spolaryzowane zaporowo ($V_{BC} \ge 0{,}65\mathrm{V}$ -dla tranzystora pnp). W kaskodzie wzmocnienie pierwszego stopnia (na tranzystorze Q_1) jest bliskie jedności, dlatego największa amplituda napięcia wystąpi na kolektorze tranzystora Q_2. Zakres zmian tego napięcia jest ograniczony dwoma skrajnymi wartościami:

$$V_{C2\max} = V_{B2} - V_{BC}; \quad V_{C2\min} = 0 \quad (26)$$

Aby napięcie wyjściowe mogło oscylować wokół wymienionych wartości skrajnych, należy tak dobrać spoczynkowy punkt pracy tranzystora Q_2 aby przy zerowym sygnale wejściowym:

$$V_{C2} = \frac{V_{C2\max}}{2} \quad (27)$$

W takiej sytuacji maksymalna amplituda napięcia wyjściowego jest równa:

$$V_{o\max} = \frac{V_{C2\max}}{2} = \frac{V_{B2} - V_{BC}}{2} \quad (28)$$

W rzeczywistości dla skrajnych wartości V_{C2max} i V_{C2min} tranzystory wchodzą w silnie nieliniowy zakres pracy powodujący duże zniekształcenia sygnału. Dlatego dobrze jest zapewnić pewien margines zapasu dynamiki i przyjąć, że maksymalna dynamika napięcia wyjściowego jest równa:

$$V_{o\max} = 0{,}8\frac{V_{C2\max}}{2} \quad (29)$$

b) ograniczenia wydajności prądowej

Całkowitym obciążeniem stopnia wyjściowego (tranzystor Q_2) jest rezystancja o wartości $R_C \| R_L$. Aby możliwe było uzyskanie na tej rezystancji maksymalnej amplitudy napięcia V_{omax}, prąd płynący przez tę rezystancję musi mieć amplitudę:

$$I_{o\max} = \frac{V_{o\max}}{R_C \| R_L} \quad (30)$$

Przy pełnym wysterowaniu kaskody, prąd kolektora będzie się zmieniać w granicach od 0 do $2I_{omax}$, a zatem spoczynkowy prąd polaryzacji tranzystorów musi mieć wartość:

$$I_{C1} = I_{C2} = I_{o\max} \quad (31)$$

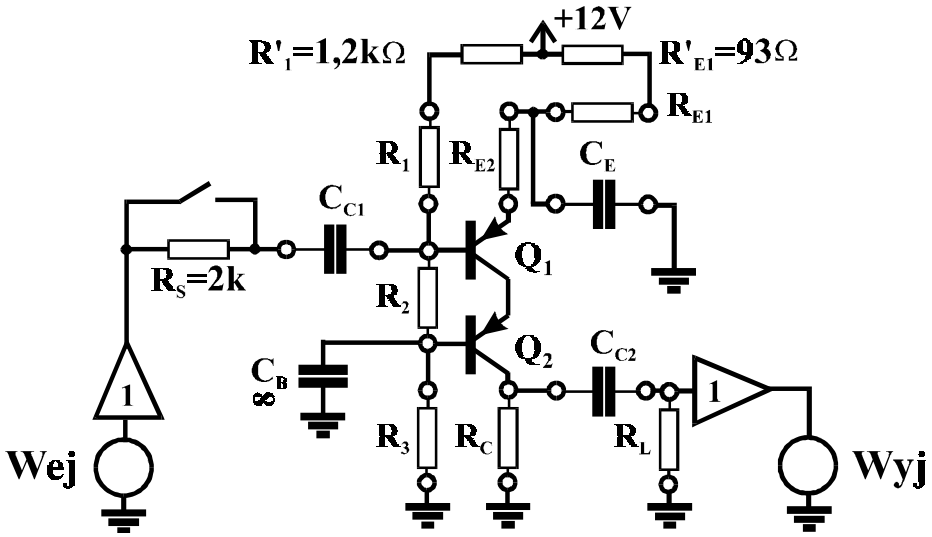
Podobnie jak w poprzednim przypadku, dążąc do minimalizacji zniekształceń, korzystnie jest zapewnić pewien margines zapasu dynamiki i przyjąć spoczynkowy prąd polaryzacji tranzystorów o wartości , np.:

$$I_{C1} = I_{C2} = 1{,}25 I_{o\max} \quad (32)$$

Aby zapewnić odpowiednią dynamikę kaskody (maksymalne napięcie wyjściowe V_{omax}) należy tak dobrać warunki polaryzacji obu tranzystorów, aby były równocześnie spełnione warunki dotyczące V_{C2} oraz I_{C1} , I_{C2} podane odpowiednio w punkcie a) i b).

5. Kompletny schemat kaskody

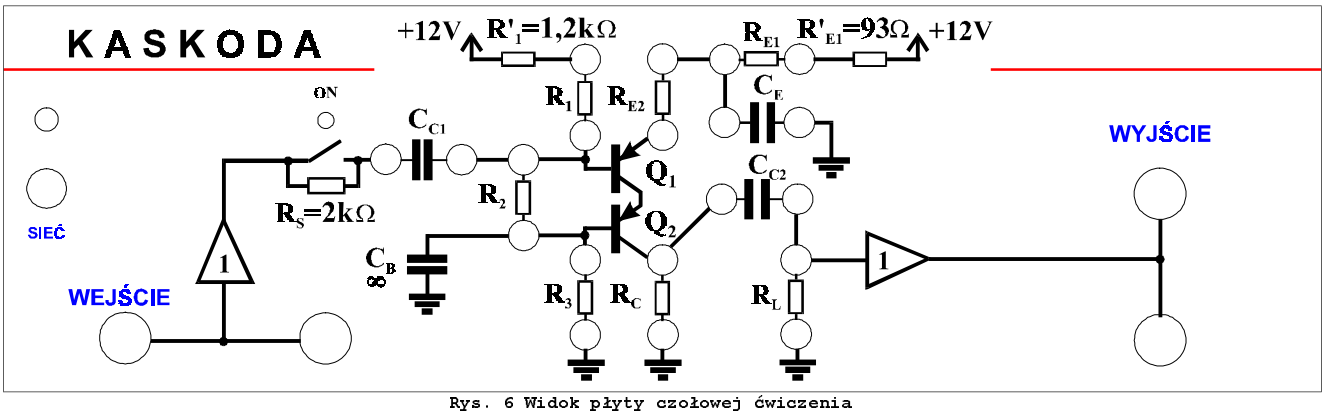
W ćwiczeniu jest do dyspozycji układ kaskody o schemacie ideowym:



Rys. 5 Kompletny schemat ideowy układu kaskody.

Wykaz wartości elementów o zmiennych parametrach:

REZYSTORY	KONDENSATORY	ELEMENTY O STAŁYCH PARAMETRACH
R_{E1} = 0 - 4kΩ;	C_{C1} = 1µF, 2.2µF, 4.7µF, 10µF, 22µF, 47µF, 100µF;	R'_1 =1.2kΩ;
R_{E2} = 0 - 220Ω;	C_{C2} = 1µF, 2.2µF, 4.7µF, 10µF, 22µF, 47µF, 100µF,	R'_{E1} =93Ω;
R_1 = 0 - 15kΩ;	220µF, 470µF;	C_B =∞
R_2 = 0 - 15kΩ;	C_E = 22µF, 47µF, 100µF, 220µF, 470µF, 1000µF;	
R_3 = 0 - 15kΩ;		
R_C = 0 - 10kΩ;		
R_L = 100Ω, 500Ω, 5kΩ, 10kΩ;		



Rys. 6 Widok płyty czołowej ćwiczenia

Literatura:

[1] Z. J. Staszak, J. Glinianowicz, D. Czarnecki, „Materiały pomocnicze do przedmiotu Układy elektroniczne liniowe”.
[2] A. Guziński, „Liniowe elektroniczne układy analogowe”, WNT, Warszawa 1992.
[3] A. Filipkowski, „Układy elektroniczne analogowe i cyfrowe”, WNT, Warszawa 1978.