

Ćwiczenie nr 5

„Wzmacniacz tranzystorowy”

Procedura projektowania wzmacniacza jednotranzystorowego OE (z kondensatorem blokującym C_E)

Obliczenia stałoprądowe

1. Dobór tranzystora

Tranzystor dobieramy adekwatnie do typu układu, w którym tranzystor ma pracować, np. w zależności od tego czy jest to wzmacniacz napięciowy m.cz., czy wzmacniacz w.cz., czy też wzmacniacz mocy.

2. Wybór napięcia zasilającego

Napięcie zasilające wybieramy w zależności od wymaganej amplitudy sygnału wyjściowego (jeśli takie wymaganie występuje w założeniach projektowych) przy uwzględnieniu typu wzmacniacza (patrz pkt 1.).

Można posłużyć się nierównością:

$$2(U_{wy}) + V_{CEsat} + U_0 < V_{CC} < V_{CEmax} \quad (1)$$

gdzie: U_{wy} – wymagana amplituda wyjściowego napięcia,

V_{CEsat} – napięcie nasycenia (zwykle przyjmuje się w granicach:

0.1V – 0.5 V, w zależności od typu tranzystora)

U_0 – zapas bezpieczeństwa podyktowany ew. przesunięciem punktu pracy (p.p.) spowodowanym zmianami temperatury i rozrzutem produkcyjnym. (można przyjąć w granicach: 0 % do kilkunastu % U_{wy} + spadek napięcia na rezystorze emiterowym, które mieści się w granicach 1V do 3V).

V_{CEmax} – maksymalna dopuszczalna wartość napięcia V_{CE} dla danego tranzystora.

Należy mieć również na uwadze fakt, iż bardzo często wartości napięć zasilających są zdeterminowane dysponowanymi źródłami zasilania.

3. Dobór punktu pracy tranzystora $Q(U_{CEQ}, I_{CQ})$

Zaleca się wybór punktu pracy (p.p.) w strefie środkowej obszaru pracy liniowej w rodzinie charakterystyk wyjściowych tranzystora.

a) Wybór współrzędnej napięciowej U_{CEQ} punktu pracy

Jeśli nie ma żadnych wymagań odnośnie położenia p.p., (a zwłaszcza wtedy, gdy prosta dynamiczna pracy pokrywa się z prostą statyczną) to napięcie U_{CEQ} można przyjąć w otoczeniu punktu $V_{CC}/2$.

Jeśli założenia projektowe dotyczą amplitudy napięcia wyjściowego, to współrzędna napięciowa U_{CEQ} punktu pracy jest ograniczona nierównością:

$$V_{CEsat} + U_{wy} + U_0 < U_{CEQ} < V_{CC} - U_{wy} - U_0 \quad (2)$$

b) Wybór współrzędnej prądowej I_{CQ} punktu pracy

Przy wyborze współrzędnej prądowej I_{CEQ} punktu pracy najczęściej występuje pewien przedział wartości, spośród których punkt ten może być wybrany. Fakt ten może być wykorzystany przy realizacji wymagań dodatkowych (o ile takie zostały sformułowane w założeniach projektowych) takich, jak np. :

- współczynnik szumów,
- częstotliwość wzmocnienia jednostkowego f_T ,
- rezystancja wejściowa, itp.

Przy wyborze współrzędnej prądowej I_{CQ} punktu pracy istotne jest również określenie spadku napięcia na rezystorze emiterowym U_{RE} .

Spadek napięcia na rezystorze emiterowym powinien być na tyle duży, ażeby zmiany napięcia U_{BE} nie stanowiły znaczącej wartości w stosunku do napięcia bazy:

$$V_B = U_{BE} + U_{RE}.$$

W praktyce, przyjmuje się

$$U_{RE} = (2 \div 3) U_{BE} , \quad (3)$$

co powoduje, iż $U_{RE} \in [1.2 \text{ V}, 2.2 \text{ V}]$.

Z drugiej strony, niektórzy autorzy zalecają ograniczenie napięcia U_{RE} w taki sposób, aby nie ograniczać zbytnio spadku napięcia na rezystancji kolektorowej, przyjmując

$$U_{RE} \in [0.1, 0.3] V_{CC} . \quad (4)$$

W przypadku, gdy wymagana jest amplituda napięcia wyjściowego U_{wy} , spadek napięcia na rezystancji emiterowej powinien spełniać nierówność:

$$U_{RE} < V_{CC} - U_{CEQ} - U_{wy} . \quad (5)$$

Zaleca się przyjmowanie wartości U_{RE} z obszaru wspólnego ograniczonego warunkami (3), (4) i (5).

Prąd spoczynkowy p.p. powinien mieścić się w granicach:

$$I_{Cmin} < I_{CQ} < I_{Cmax} , \quad (6)$$

gdzie:

$$I_{Cmin} = U_{wy}/R_L , \quad (7)$$

R_L – rezystancja obciążenia,

I_{Cmax} - maksymalna dopuszczalna wartość prądu I_C dla danego tranzystora, bądź wartość wynikająca z ograniczenia mocą dopuszczalną tranzystora: $I_{Cmax} = P_{tot} / U_{CEQ}$.

Jeśli są dane - amplituda napięcia wyjściowego, rezystancja obciążenia oraz wyznaczony wyżej spadek napięcia na rezystorze emiterowym, to celem określenia wartości spoczynkowej prądu w p.p. można skorzystać z zależności:

$$I_{CQ} = U_{RC} U_{wy} / [R_L (U_{RC} - U_{wy})], \quad (8a)$$

gdzie: $U_{RC} = V_{CC} - U_{CEQ} - U_{RE}$ - spadek napięcia na rezystorze kolektorowym.

Należy stwierdzić, że powinien być spełniony warunek

$$(U_{RC} - U_{wy}) > 0, \quad (8b)$$

W przeciwnym przypadku, można podnieść wartość V_{CC} mając jednocześnie na uwadze warunek (1).

4. Obliczenie rezystancji R_E

$$R_E = U_{RE} / I_{CQ}. \quad (9)$$

5. Obliczenie rezystancji kolektorowej R_C

$$R_C = U_{RC} / I_{CQ} \quad (10)$$

gdzie: $U_{RC} = V_{CC} - U_{CEQ} - U_{RE}$,

Sprawdzenie realizowalności wzmocnienia

Rezystancję dynamiczną wyznacza się na podstawie znajomości wzmocnienia napięciowego:

$$|K_u| \approx I_{CQ} R_{ac} / V_T = U_{wy} / V_T = g_m R_{ac} \quad (11)$$

gdzie: $R_{ac} = R_C \parallel R_L$ - rezystancja dynamiczna. (12)

Wartość g_m należy odczytać dla ustalonej wyżej wartości I_{CQ} .

(Nietrudno zauważyć, że wzmocnienie i amplituda są ze sobą powiązane i założenia projektowe odnośnie ich wartości nie mogą być formułowane w sposób dowolny).

Sprawdzenie, czy wartość chwilowa prądu kolektorowego może przekroczyć wartość dopuszczalną:

$$i_C = I_{CQ} + (U_{CEQ} - V_{CEsat}) / R_{ac} < I_{Cmax} . \quad (13)$$

Jeśli warunek powyższy nie jest spełniony, to należy zmniejszyć wartość I_{CQ} . Jeśli jest to niemożliwe, to należy zmienić tranzystor.

6. Wyznaczenie dzielnika potencjometrycznego zasilającego bazę tranzystora

Prąd bazy można określić ze wzoru:

$$I_{BQ} = I_{CQ} / \beta_{dc}, \quad (14)$$

gdzie: β_{dc} - współczynnik wzmocnienia prądowego stałoprądowego tranzystora.

I_{BQ} można określić również na podstawie charakterystyk tranzystora (np. przy użyciu programu PSPICE).

Przyjęcie wartości prądu dzielnika I_{dz} :

$$I_{CQ} \gg I_{dz} \geq k * I_{BQ} . \quad (15)$$

Najczęściej przyjmuje się $k = 10$

$$I_{dz} = k * I_{BQ} . \quad (16)$$

Niemniej, jeśli w wyniku tego uzyska się zbyt duże wartości rezystancji, to wskazane jest podwyższenie wartości prądu dzielnika.

Obliczenie rezystancji R_1 i R_2 :

$$R_1 = (V_{CC} - V_B) / I_{dz} , \quad (17)$$

$$R_2 = V_B / (I_{dz} (1 - 1/k)) . \quad (18)$$

Sprawdzenie, czy dzielnik polaryzujący nie obniża znacząco rezystancji wejściowej

Obliczenie rezystancji zastępczej R_B uogólnionego układu zasilania:

$$R_B = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \quad (19)$$

$$\text{Sprawdzenie, czy } R_B \gg r_{we} , \quad (20)$$

$$\text{gdzie: } r_{we} = h_{11e} \approx r_{b'e} . \quad (21)$$

Jeśli warunek (20) nie jest spełniony, to wówczas należy obniżyć prąd dzielnika i wyznaczyć nowe wartości R_1 i R_2 , lub skorzystać z warunku na odpowiedni wybór współczynnika k w formule (16) :

$$\begin{aligned} k &\ll [(V_{CC} - V_B) \chi - 1] (V_B / V_{CC}) + 1 = \\ &= [V_{CC} (1 - U_{BE} / V_{CC} - V_{CC} R_E / V_{CC}) \chi - 1] (U_{BE} / V_{CC} + U_{RE} / V_{CC}) + 1 = \\ &= [U_{BE} (V_{CC} / U_{BE} - U_{RE} / U_{BE} - 1) \chi - 1] (1 + U_{RE} / U_{BE}) / (V_{CC} / U_{BE}) + 1 \end{aligned}$$

(22)

gdzie: $\chi = \beta_{dc} / (\beta_{ac} V_T)$.

Sprawdzenie, czy układ polaryzujący spełnia warunki stabilizacji p.p.

W przypadku braku ścisłych wymagań dotyczących wrażliwości p.p. na zmiany wywołane głównie rozrzutami produkcyjnymi współczynnika β_{dc} i napięcia U_{BE} , można tak zaprojektować dzielnik potencjometryczny, aby spełniony był warunek:

$$R_B < \beta_{dc} R_E / t. \quad (23)$$

Najczęściej przyjmuje się $t = 10$.

Warunek (23) wymusza właściwy projekt dzielnika polaryzującego bazę tranzystora poprzez odpowiedni wybór współczynnika k w zależności (16):

$$k > [t (V_{CC} / U_{BE} - U_{RE} / U_{BE} - 1) / (U_{RE} / U_{BE} - 1) (1 + U_{RE} / U_{BE}) / (V_{CC} / U_{BE}) + 1]. \quad (24)$$

Czasami warunki (22) i (24) mogą być sprzeczne, wówczas należy zmienić napięcie zasilające, lub tranzystor i powtórzyć obliczenia.

Wartość współczynnika k należy przyjąć z zakresu wyznaczonego nierównościami (22) i (24), a następnie obliczyć rezystancje R_1 , R_2 i R_2 posługując się wzorami (17) i (18).

(Rezystancje te można również wyznaczyć na podstawie modelu zastępczego Thevenina dla obwodu wejściowego:

$$R_B = (V_{CC} - V_B) V_B \beta_{dc} / ([V_{CC} (k-1) + V_B] I_{CQ})$$

$$E_{BB} = U_{BE} + I_{CQ} (R_E + R_B / \beta_{dc})$$

$$R_1 = R_B V_{CC} / E_{BB}$$

$$R_2 = R_B V_{CC} / (V_{CC} - E_{BB}).$$

Ewentualne niewielkie rozbieżności pomiędzy obiema metodami mogą wynikać z niedokładności wyznaczenia napięcia zastępczego E_{BB} lub prądu dzielnika).

W przypadku, gdy założenia projektowe obejmują wymagania dotyczące dopuszczalnych zmian prądu kolektorowego ΔI_C wymuszonych rozrzutami

produkcyjnymi, wówczas rezystancja emiterowa powinna spełniać nierówność:

$$R_E > R_{Emin} = (-\Delta U_{BE} + \sqrt{\Delta}) / (2 \Delta I_C), \quad (24)$$

gdzie: $\Delta = (\Delta U_{BE})^2 + 4(\Delta I_C) R_B (E_{BB} - U_{BE}) (\Delta \beta) / \beta^2$
 ΔU_{BE} – rozrzut produkcyjny U_{BE} ,
 $\Delta \beta$ - rozrzut produkcyjny β .

Jeśli powyższa nierówność nie jest spełniona, to należy zmienić wartość R_B i wykonać ponownie obliczenia wg pkt. 6.

Uzyskane wyniki należy zweryfikować przy użyciu symulatora komputerowego PSPICE (lub podobnego). Należy przy tym zwrócić uwagę, czy stosowany model tranzystora w programie komputerowym jest zgodny z użytym do obliczeń ręcznych.

Obliczenia małosygnałowe

1. Określenie wartości elementów modelu hybryd π

Wartości elementów modelu hybryd π takie, jak β , $C_{b'e}$, r_{ce} , $r_{bb'}$, $C_{b'c}$, $r_{b'e}$, g_m należy określić dla punktu pracy obliczonego w poprzednim rozdziale.

2. Obliczenie parametrów roboczych układu z kondensatorem C_3

Rezystancja wejściowa:

$$R_{WE} = \frac{R_B h_{11e}}{R_B + h_{11e}} \approx \frac{R_B r_{b'e}}{R_B + r_{b'e}}. \quad (1)$$

Rezystancja wyjściowa:

$$R_{wy} = \frac{R_C r_{ce}}{R_C + r_{ce}}. \quad (2)$$

Wzmocnienie napięciowe:

$$Ku = \frac{U_2}{U_1} = -g_m R_{ac}, \quad (3)$$

gdzie:

$$R_{ac} = R_C \parallel R_L.$$

W przypadku, gdy brak jest kondensatora blokującego C_E wzmocnienie napięciowe można wyznaczyć z zależności:

$$Ku = \frac{U_2}{U_1} = -R_{ac} / R_E. \quad (3a)$$

Wzmocnienie napięciowe skuteczne:

$$Kusk = \gamma Ku, \quad (4)$$

gdzie: $\gamma = \frac{Rwe}{Rwe + Rg}$.

Rg - rezystancja generatora (określona na podstawie danych technicznych przyrządu)

3. Wyznaczenie dolnej częstotliwości granicznej

Obliczenie stałej czasowej związanej z kondensatorem C_1 :

$$\tau_1 = (Rg + Rwe)C_1, \quad (5)$$

$$fd1 = \frac{1}{2\pi\tau_1}. \quad (6)$$

Obliczenie stałej czasowej związanej z kondensatorem C_2 :

$$\tau_2 = (Rwy + Rl)C_2, \quad (7)$$

$$fd2 = \frac{1}{2\pi\tau_2}. \quad (8)$$

Obliczenie stałej czasowej związanej z kondensatorem C_E :

$$\tau_E \approx R_T C_E, \quad (9)$$

gdzie: $R_T = R_E \parallel ((r_{bb} + r_{be} + R_g) / \beta).$

Jeśli $R_E \gg (r_{bb} + r_{be} + R_g) / \beta$ to można przyjąć, że $R_T = 1/g_m$ i wtedy

$$\tau_E \approx \frac{C_E}{g_m}, \quad (9a)$$

$$fd3 \approx \frac{1}{2\pi\tau_E}. \quad (10)$$

Jeśli w/w bieguny są odseparowane, to można przyjąć

$$fd \approx \max(fd1, fd2, fd3), \quad (11a)$$

Jeśli zaś nie są odseparowane, to posługujemy się zależnością:

$$fd = \sqrt{fd1^2 + fd2^2 + fd3^2} \quad (11b)$$

4. Wyznaczenie górnej częstotliwości granicznej (bez uwzględnienia pojemności korekcyjnej C_d)

$$f_g = \frac{1}{2\pi R C_t}, \quad (12)$$

gdzie:

$$R \approx (R_g \parallel R_B + r_{bb}) \parallel r_{be}$$

$$C_t = C_{b'e} + C_{b'c} (1 + g_m R_{zas})$$

$$R_{zas} = r_{ce} \parallel R_c \parallel R_l.$$

5. Wyznaczenie pojemności korekcyjnej C_d

$$C_d = \left(\frac{1}{2\pi f_g R} - C_t \right) / (1 + g_m R_{zas}) \quad (13)$$

Przypadek układu pozbawionego kondensatora C_E

W przypadku układu pozbawionego kondensatora C_E należy wyznaczyć współczynnik

$$\beta_U = R_E / R_{zas} \quad (14)$$

oraz różnicę zwrotną

$$F = 1 - \beta_U K_U = 1 + g_m R_E. \quad (15)$$

Znając wartość różnicy zwrotnej, można obliczyć wszystkie parametry robocze wzmacniacza z prądowo-szeregowym sprzężeniem zwrotnym z wystarczającą dokładnością dla potrzeb laboratoryjnych.

Uzyskane wyniki należy zweryfikować przy użyciu symulatora komputerowego PSPICE (lub podobnego). Należy przy tym zwrócić uwagę, czy stosowany model tranzystora w programie komputerowym jest zgodny z użytym do obliczeń ręcznych.