

3.1 AMPLIFICATOARE DE SEMNAL MIC CU UN TRANZISTOR

Cele mai simple aplicații la care se utilizează modelele de semnal mic ale tranzistoarelor sunt amplificatoarele de semnal mic cu un tranzistor. Amplificatorul este circuitul care mărește puterea unui semnal în condițiile păstrării formei acestuia. Analiza amplificatoarelor presupune cunoașterea parametrilor acestora.

3.1.1 Modelul fundamental al amplificatorului de tensiune

Modelul unui amplificator se utilizează pentru analiza de semnal și poate fi reprezentat sub forma a doi uniporturi, numiți simplu intrare și respectiv ieșire. Din punctul de vedere al semnalului, amplificatorul este pasiv la intrare și activ la ieșire; uniportul pasiv de la intrare se echivalează cu o rezistență dinamică, iar cel activ de la ieșire cu o sursă Thévenin. La amplificatorul de tensiune ambele mărimi electrice, de la intrarea și de la ieșirea amplificatorului, sunt tensiuni. Ca urmare, modelul fundamental al amplificatorului de tensiune, prezentat în figura 3.26, constă dintr-o sursă de tensiune controlată în tensiune, cu un factor de amplificare A_{u0} , o rezistență de intrare R_i și o rezistență de ieșire R_o , aceste trei elemente fiind de fapt parametrii cei mai importanți ai amplificatorului.

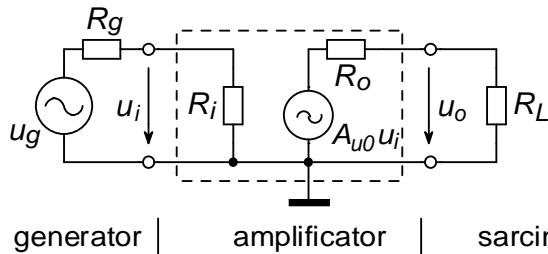


Fig. 3.26. Modelul amplificatorului de tensiune – schema echivalentă.

Amplificatorul este completat cu un generator de semnal la intrare și cu o rezistență de sarcină la ieșire.

Dacă se conectează la ieșire o sarcină rezistivă R_L , atunci tensiunea de ieșire și amplificarea în tensiune se pot calcula cu regula divizorului de tensiune:

$$u_o = A_{u0} u_i \frac{R_L}{R_L + R_o}, \quad A_u = \frac{u_o}{u_i} \Rightarrow A_u = A_{u0} \frac{R_L}{R_L + R_o} \quad (3.58).$$

Pentru amplificatorul fără sarcină, $R_L = \infty$, rezultă $A_u = A_{u0}$. De aceea A_{u0} se numește amplificarea de tensiune în gol (sau la mers în gol). Prezența sarcinii reduce amplificarea; pentru ca diminuarea amplificării să fie minimă:

$$A_u \cong A_{u0}, \quad \text{trebuie ca} \quad R_o \ll R_L \quad (3.59).$$

Rezistența de intrare a amplificatorului R_i , introduce o atenuare a semnalului la intrare:

$$u_i = u_g \frac{R_i}{R_i + R_g} = u_g k_{ui} \quad (3.60),$$

unde k_{ui} este factorul de cuplaj în tensiune la intrare. Pentru ca atenuarea la intrare să fie minimă:

$$u_i \cong u_g, \quad \text{trebuie ca} \quad R_i \gg R_g \quad (3.61).$$

Amplificatorul de tensiune ideal ar trebui să aibă $R_i = \infty$ și $R_o = 0$. Pentru ca atenuarea semnalului la intrarea și la ieșirea amplificatorului să fie neglijabile, în practică este suficient să fie îndeplinite inegalitățile (3.59) și (3.61).

3.1.2 Etaj de amplificare cu un tranzistor în conexiune EC

Schema clasică a unui etaj de amplificare realizat cu tranzistor discret în conexiune EC este prezentată în figura 3.27.

La analiza circuitului în cc, condensatoarele se consideră întreruperi de circuit. Circuitul de polarizare cu rezistență în emitor și divizor de polarizare a bazei a fost studiat într-un paragraf anterior (3.6.6). Curentul de colector I_C se determină conform relației (3.33) și cu ajutorul acestui curent se pot determina parametrii de regim dinamic ai tranzistorului (care depind de I_C).

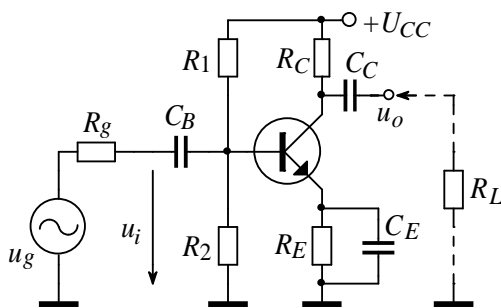


Fig. 3.27. Schema amplificatorului cu un tranzistor discret în conexiune EC.

- Tranzistorul este polarizat cu divizor în bază și rezistență în emitor.
- Condensatoarele din circuit se consideră scurtcircuitate în ca.

Condensatoarele din circuit au o capacitate suficient de mare astfel încât reactanța capacitivă a acestora să fie neglijabilă (față de rezistențele cu care sunt înseriate) pentru domeniul frecvențelor de interes. Condensatoarele din bază și din colector se numesc condensatoare de cuplaj fiind utilizate pentru cuplarea generatorului de semnal la intrare, respectiv cuplarea sarcinii la ieșire. Condensatorul din emitor se numește condensator de decuplare și are rolul de a decupla rezistența din emitor în ca, sau cu alte cuvinte are rolul de a pune emitorul la masă în ca. Se realizează astfel, din punctul de vedere al semnalului, conexiunea emitor comun (EC) pentru tranzistor (emitorul, conectat la masă, este comun intrării și ieșirii amplificatorului).

Analiza de regim dinamic (sau de ca) se face cu ajutorul schemei echivalente de regim dinamic din figura 3.28.a, care s-a obținut prin înlocuirea condensatoarelor și a sursei de alimentare cu scurtcircuitate.

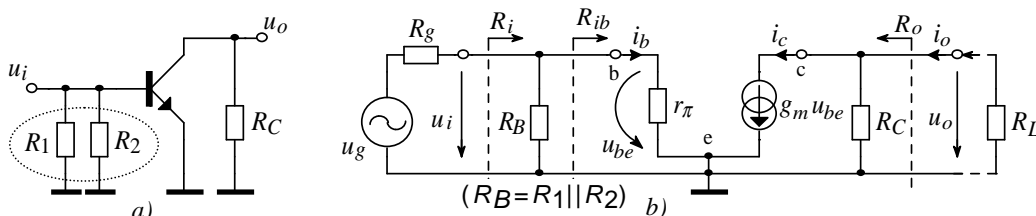


Fig. 3.28. Scheme echivalente de ca ale amplificatorului în conexiunea EC: a) C și U_{CC} înlocuite cu scurtcircuitate, b) TB linearizat, în condiții de semnal mic.

Dacă este îndeplinită condiția de semnal mic (3.44), tranzistorul se poate înlocui cu una dintre schemele echivalente liniarizate; în figura 3.28.b s-a utilizat schema simplificată în π . Acest circuit permite determinarea prin calcul a parametrilor amplificatorului.

Amplificarea de tensiune în gol (fără R_L) este direct proporțională cu transconductanța și cu rezistența de colector:

$$A_{u0} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c R_C}{u_i} = \frac{-g_m u_{be} R_C}{u_{be}} = -g_m R_C \quad (3.62).$$

Semnul „-“ rezultă datorită sensului diferit al tensiunii și al curentului prin R_C și semnifică faptul că amplificatorul este inversor, adică semnalul de ieșire este în antifază cu semnalul de intrare (defazat cu 180 de grade).

Rezistența de intrare este rezistența văzută de generatorul de semnal:

$$R_i = R_B \parallel R_{ib}, \quad R_B = R_1 \parallel R_2, \quad R_{ib} = \frac{u_i}{i_b} = r_\pi \quad (3.63).$$

Rezistența de ieșire este rezistența sursei Thévenin echivalente, rezistența văzută de sarcină după pasivizarea surselor independente ($u_g=0$):

$$R_o = \left. \frac{u_o}{i_o} \right|_{u_g=0} = R_C \quad (u_g=0 = u_{be} \Rightarrow g_m u_{be} = 0) \quad (3.64).$$

Pasivizarea sursei de semnal conduce la anularea sursei comandate de curent, iar sursa de curent anulată este echivalentă cu o întrerupere de circuit.

Parametrii tranzistorului și implicit parametrii amplificatorului depind de psf . Astfel, la creșterea curentului static de colector I_C , transconductanța g_m crește, rezistența de intrare în bază r_π scade și ca urmare amplificarea în tensiune A_{u0} crește iar rezistența de intrare R_i scade.

Amplificarea în tensiune în prezența sarcinii se poate determina cu ajutorul relației (3.58), iar efectul rezistenței generatorului asupra amplificării poate fi calculat cu (3.60). Ținând seama de aceste relații se poate determina amplificarea globală în tensiune:

$$A_{ug} = \frac{u_o}{u_g} = \frac{u_o}{u_i} \frac{u_i}{u_g} \Rightarrow A_{ug} = A_{u0} \frac{R_L}{R_L + R_o} \frac{R_i}{R_i + R_g} \quad (3.65)$$

Pentru a obține o amplificare globală cât mai mare $A_{ug} \cong A_{u0}$, trebuiesc îndeplinite inecuațiile (3.59) și (3.61). La acest tip de amplificator, amplificarea în tensiune în gol are valori destul de mari, dar amplificarea globală este redusă semnificativ datorită rezistenței de intrare moderate și a rezistenței de ieșire destul de mari.

3.1.3 Repetorul pe emitor

Repetorul pe emitor, sau amplificatorul cu tranzistor în conexiunea CC, este o configurație de circuit frecvent utilizată la amplificatoarele de semnal mic, la cele de semnal mare cât și la circuitele digitale. Circuitul cu tranzistor discret este prezentat în figura 3.29.a. Colectorul tranzistorului este conectat la masă din punctul de vedere al semnalului (borna de alimentare este masă de semnal) și de aceea circuitul se numește și amplificator cu colectorul la masă (sau colector comun), cu intrarea în baza tranzistorului și ieșirea preluată din emitor. Generatorul de semnal și rezistența de sarcină sunt conectate prin condensatoare suficient de mari ca să poată fi considerate scurtcircuitate pentru semnalele de ca.

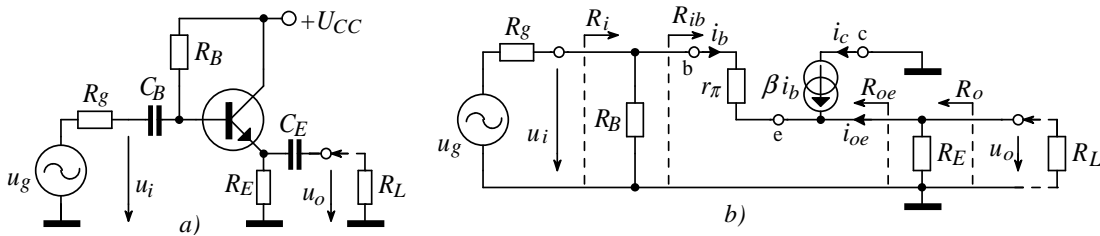


Fig. 3.29. Repetorul pe emitor: a) schema de principiu; b) schema echivalentă de ca cu tranzistorul liniarizat (ca SIc1), în condiții de semnal mic.

Curentul de colector I_C din *psf* se determină cu relația (3.33), cu $U_{BB}=U_{CC}$, iar parametrii de semnal mic ai tranzistorului se determină cu (3.48) și (3.52).

În condiții de semnal mic, conforme cu (3.44), se poate utiliza oricare dintre schemele echivalente de semnal mic ale tranzistorului. În figura 3.29.b s-a utilizat modelul în π simplificat cu tranzistorul privit ca o sursă de curent controlată în curent (conform cu figura 3.24.b).

Parametrii amplificatorului se determină pe baza schemei de ca din figura 3.29.b. Pentru a calcula amplificarea în tensiune în gol se consideră circuitul fără sarcină, $R_L=\infty$. Se exprimă tensiunea de ieșire și de intrare funcție de curentul de bază (mărimea de legătură între ieșire și intrare, care apare atât în circuitul de ieșire cât și în cel de intrare):

$$\begin{aligned} u_o &= R_E i_e = R_E (i_b + i_c) = R_E (\beta + 1) i_b \\ u_i &= u_{be} + u_o = r_\pi i_b + R_E (\beta + 1) i_b \end{aligned} \quad (3.66).$$

Amplificarea în tensiune în gol rezultă subunitară deoarece tensiunea de intrare este mai mare decât cea de ieșire (pe care o include):

$$A_{u0} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o}{u_{be} + u_o} = \frac{(\beta + 1) R_E}{r_\pi + (\beta + 1) R_E} = \frac{1}{1 + \frac{r_\pi}{(\beta + 1) R_E}} \quad (A_{u0} < 1) \quad (3.67).$$

Valoarea amplificării este apropiată de unitate, pentru:

$$r_\pi \ll (\beta + 1) R_E \quad \Rightarrow \quad A_{u0} \cong 1 \quad (3.68).$$

Deoarece tensiunea în emitor repetă tensiunea din bază ($A_{u0} \cong 1$, $u_e \cong u_b$ – în *ca*), acest amplificator se numește **repetor pe emitor**.

Faptul că **tensiunea din bază se repetă în emitor** este o proprietate generală a unui tranzistor care lucrează în RAN și care are o rezistență conectată în emitor (chiar dacă colectorul nu este conectat la masă).

La conectarea sarcinii, cele două rezistențe din emitor apar în paralel (în *ca*). Rezistența de emitor în *ca* și amplificarea în tensiune devin:

$$R_e = R_E \parallel R_L, \quad A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{(\beta+1)R_e}{r_\pi + (\beta+1)R_e} = \frac{1}{1 + \frac{r_\pi}{(\beta+1)R_e}} \quad (3.69).$$

Deoarece $R_e < R_E$ rezultă $A_u < A_{u0}$; amplificarea scade în prezența sarcinii.

Rezistența de intrare este rezistența văzută de generatorul de semnal în prezența sarcinii:

$$R_i = R_B \parallel R_{ib}, \quad R_{ib} = \frac{u_i}{i_b} = r_\pi + (\beta+1)(R_E \parallel R_L) = r_\pi + (\beta+1)R_e \quad (3.70).$$

Dacă sarcina lipsește, atunci va fi înlocuită cu o rezistență infinită $R_L = \infty$ și rezultă $R_E \parallel R_L = R_E$. Valoarea rezistenței de intrare este relativ mare și depinde de rezistența conectată în emitorul tranzistorului.

Dacă se înlocuiește r_π în relația precedentă conform relației (3.57), se obține **regula de reflectare a rezistențelor din emitor în bază**:

$$R_{ib} = (\beta+1)r_e + (\beta+1)R_e = (\beta+1)(r_e + R_e), \quad (\text{cu } R_e = R_E \parallel R_L) \quad (3.71),$$

regulă care se poate exprima astfel: **Rezistența văzută în baza unui tranzistor este rezistența totală din bucla emitorului multiplicată cu factorul $(\beta+1)$** .

Rezistența de ieșire este rezistența sursei Thévenin echivalente, adică rezistența văzută de sarcină după pasivizarea surselor independente ($u_g=0$):

$$R_o = \left. \frac{u_o}{i_o} \right|_{u_g=0} = R_E \parallel R_{oe} \quad (3.72).$$

Rezistența văzută în emitorul tranzistorului R_{oe} (de ieșire din emitor) este rezistența sursei Thévenin echivalente (văzută de rezistența R_E). Pentru calculul acestei rezistențe se presupune aplicată o tensiune u_o (de *ca*) și se pasivizează sursa u_g . Căderea de tensiune pe bucla bazei este tensiunea u_o , iar curentul spre emitorul tranzistorului este inversul sumei curenților prin bază și colector:

$$R_{oe} = \left. \frac{u_o}{i_{oe}} \right|_{u_g=0} = \frac{-r_\pi i_b - (R_B \parallel R_g) i_b}{-i_b - \beta \cdot i_b} = \frac{r_\pi + (R_B \parallel R_g)}{\beta+1} \quad (3.73).$$

Rezistența de ieșire din repetorul pe emitor este relativ mică și depinde de rezistența internă a generatorului conectat la intrare. Rezultatul obținut se poate exprima ca fiind regula de reflectare a rezistențelor din baza în emitorul unui tranzistor, regulă care se enunță astfel: **Rezistența văzută în emitorul unui tranzistor este rezistența totală din bucla bazei divizată cu factorul $(\beta+1)$.**

Deoarece rezistența de intrare a amplificatorului depinde de sarcină iar rezistența de ieșire depinde de rezistența internă a generatorului, modelul general al amplificatorului de tensiune trebuie folosit cu precauție, deoarece repetorul pe emitor nu este o entitate independentă, parametrii lui depinzând și de circuitul exterior. Modalitatea practică de lucru este următoarea:

- dacă se analizează circuitul la ieșire, atunci trebuie considerat generatorul conectat la intrare,
- dacă se analizează circuitul la intrare, atunci trebuie considerată sarcina conectată la ieșire.

Se poate concluziona că repetorul pe emitor se comportă ca un transformator de impedanțe (în *ca*) cu **o amplificare în tensiune aproximativ unitară, o rezistență de intrare mare și o rezistență de ieșire mică**. Acest montaj poate fi utilizat pentru a conecta o sarcină de valoare mică la o sursă de semnal cu rezistență internă relativ mare. Amplificarea în tensiune globală, în prezența sarcinii se poate determina utilizând relația (3.60):

$$A_{ug} = \frac{u_o}{u_g} = \frac{u_o}{u_i} \frac{u_i}{u_g} \Rightarrow A_{ug} = A_u \frac{R_i}{R_i + R_g} \quad (3.74).$$

Rezistența de intrare R_i se calculează în prezența sarcinii, cu relația (3.70). Efectul de cuplare al sarcinii la ieșirea amplificatorului este inclus implicit în A_u (această amplificare s-a calculat în prezența sarcinii, cu $R_e = R_E || R_L$). Deoarece rezistența de intrare este mare, în cazurile practice obișnuite, se obține o amplificare globală $A_{ug} \cong A_u$, apropiată de unitate. La prima vedere, o amplificare unitară este lipsită de interes practic. Repetorul pe emitor este util în cazul în care sarcina are o valoare mult mai mică decât rezistența internă a generatorului de semnal.