

Pentru evitarea introducerii distorsiunilor în forma de undă a semnalelor prin care este reprezentată informația, circuitele de amplificare trebuie să funcționeze în regim liniar.

În cazul în care circuitele de amplificare sunt realizate pe bază de tranzistoare bipolare, pentru ca amplificatoarele respective să funcționeze în regim liniar, este necesar ca tranzistoarele din structura lor să funcționeze în regim variabil de semnal mic, caz în care amplificatoarele se numesc amplificatoare de semnal mic.

În plus, din același motiv, dacă amplificatoarele sunt realizate pe baza tranzistoarelor bipolare, atunci acestea trebuie să funcționeze în Regiunea Activă Normală.

În continuare, se consideră că toate amplificatoarele prezentate sunt amplificatoare de semnal mic, iar tranzistoarele bipolare funcționează în Regiunea Activă Normală.

Pentru fiecare tip de amplificator, se prezintă relațiile care permit calcularea Punctului Static de Funcționare al tranzistorului bipolar, definit de mărimile continue I_C și V_{CE} , respectiv relațiile care permit determinarea valorilor parametrilor de semnal mic ai amplificatoarelor, valabile în banda de frecvență a amplificatorului, și anume:

- relația de calcul a factorului de amplificare în tensiune A_v ,
- relația de calcul a factorului de amplificare în curent A_i ,
- relația de calcul a rezistenței de intrare în amplificator R_i ,
- relația de calcul a rezistenței de ieșire din amplificator R_o .

Relațiile specifice parametrilor de semnal mic ai amplificatoarelor prezentate sunt deduse pe baza circuitului echivalent al tranzistorului bipolar, valabil în regim variabil de semnal mic, în banda de frecvență; în acest caz, tranzistorul bipolar este înlocuit între cele 3 terminale cu circuitul sau echivalent, valabile în regim variabil de semnal mic, în domeniul frecvențelor joase și medii. Metoda prin care sunt deduse relațiile pentru parametrii de semnal mic ai amplificatoarelor este prezentată la finalul cursului, în care se prezintă analiza unui amplificator de semnal mic, cu tranzistor bipolar.

I. Amplificatoare de semnal mic cu tranzistoare bipolare

În funcție de modul în care se poate utiliza un tranzistor bipolar într-un circuit de amplificare, mod stabilit de terminalele tranzistorului la care se consideră intrarea, ieșirea, respectiv masa amplificatorului, atunci când acesta funcționează în regim variabil, există trei configurații elementare de circuite de amplificare cu tranzistoare bipolare, sugerate și în Figura 1, și anume:

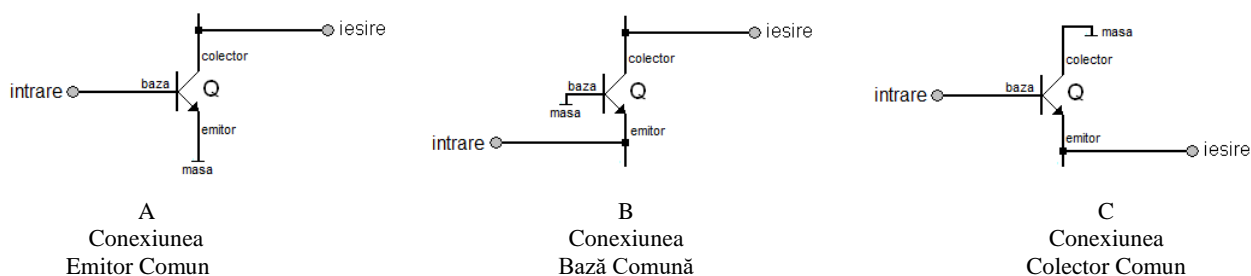


Figura 1. Conexiunile de bază ale amplificatoarelor cu tranzistoare bipolare

- amplificator cu tranzistor bipolar în conexiunea **Emitter Comun**, la care intrarea amplificatorului este aplicată în baza tranzistorului, iar ieșirea amplificatorului este furnizată din colectorul tranzistorului;
- amplificator cu tranzistor bipolar în conexiunea **Bază Comună**, la care intrarea amplificatorului este aplicată în emitorul tranzistorului, iar ieșirea amplificatorului este furnizată din colectorul tranzistorului;

- amplificator cu tranzistor bipolar în conexiunea **Colector Comun**, la care intrarea amplificatorului este aplicată în baza tranzistorului, iar ieșirea amplificatorului este furnizată din emitorul tranzistorului.

În figura de mai sus, și de asemenea, în toate circuitele de amplificare care vor fi prezentate, se consideră doar tranzistoare bipolare de tip NPN. Pentru amplificatoarele realizate pe baza tranzistoarelor bipolare de tip PNP, discuția este similară, iar configurațiile circuitelor sunt identice, cu excepția sursei de alimentare V_{CC} , care se introduce în circuit invers, cu borna + la masa circuitului.

Atunci când sunt utilizate în circuitele de amplificare, tranzistoarele bipolare trebuie să funcționeze în Regiunea Activă Normală, pentru a nu introduce distorsiuni în forma de undă a semnalelor prin care este reprezentată informația. Regiunea de funcționare a tranzistoarelor este stabilită prin polarizarea acestora, realizată prin intermediul circuitelor de polarizare. Tranzistoarele bipolare utilizează 3 circuite elementare de polarizare și anume:

- circuit de polarizare elementar,
- circuit de polarizare cu rezistor în emitor,
- circuit de polarizare cu divizor rezistiv în bază.

Deoarece aceste circuite stabilesc regiunea de funcționare a tranzistorului bipolar, ele fac parte din schema electronică a circuitelor de amplificare. În continuare, se prezintă variantele de circuite de amplificare, realizate pe baza ultimelor 2 circuite de polarizare (cu rezistor în emitor, respectiv cu divizor rezistiv), care corespund celor 3 tipuri de conexiuni de bază în care se pot utiliza tranzistoarele bipolare în acest tip de circuite. În general, în amplificatoare se utilizează ultimile 2 circuite de polarizare deoarece pentru primul circuit (cel elementar), Punctul Static de Funcționare al tranzistorului și implicit regiunea în care tranzistorul bipolar funcționează, sunt sensibile la variațiile de temperatură, respectiv la fenomenul de dispersie tehnologică, specific parametrului β - factorul de amplificare în curent al tranzistorului bipolar. În Figura 2 se reamintesc cele două circuite de polarizare ale tranzistorului bipolar, utilizate în amplificatoarele care urmează a fi prezentate.

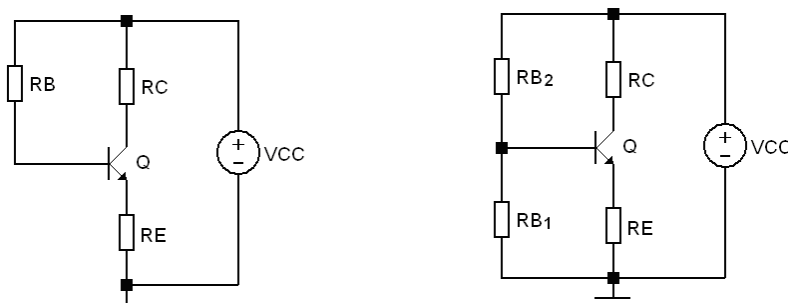


Figura 2. Circuitele de polarizare ale tranzistorului bipolar, utilizate în amplificatoarele prezentate (cu rezistor în emitor – stânga; cu divizor rezistiv – dreapta)

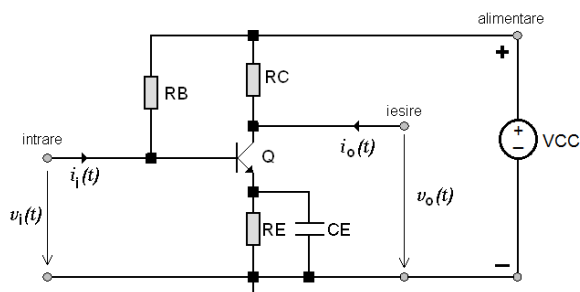
1. Amplificatoare cu tranzistoare bipolare în conexiunea Emitor Comun (EC) – amplificator de putere

În conexiunea Emitor Comun (EC), amplificatoarele cu tranzistoare bipolare (TB) sunt de 2 tipuri și anume:

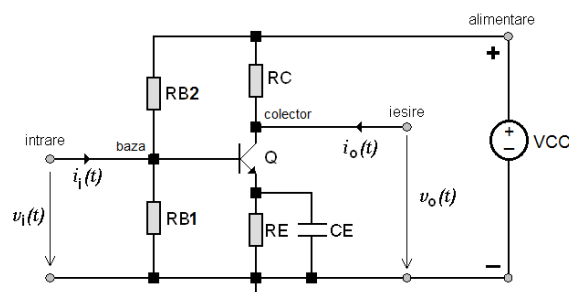
- amplificator cu tranzistor bipolar cu condensator în emitor,
- amplificator cu tranzistor bipolar fără condensator în emitor.

a. Amplificator cu tranzistor bipolar în conexiunea Emitor Comun, cu condensator în emitor

Cele 2 variante de amplificatoare cu tranzistor bipolar în conexiunea Emitor Comun, cu condensator în emitor, sunt prezentate în Figura 3, în care se specifică și sursa de alimentare V_{CC} .



A. Amplificator cu TB în conexiunea EC cu rezistor în emitor



B. Amplificator cu TB în conexiunea EC cu divizor rezistiv în bază

Figura 3. Amplificatoare cu tranzistoare bipolare în conexiunea Emitor Comun, cu condensator în emitor.

Relațiile de calcul pentru **PSF-ul** tranzistorului bipolar sunt indicate mai jos:

Amplificator cu TB în conexiunea EC cu rezistor în emitor

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E)$$

Amplificator cu TB în conexiunea EC cu divizor rezistiv în bază

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B}$$

$$V_{BB} = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC}$$

$$R_B = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E)$$

Se reamintește faptul că tranzistorul bipolar funcționează în RAN dacă este satisfăcută condiția:

$$0,5[V] < V_{CE} < V_{CC} - 0,5[V]$$

Parametrii de semnal mic a celor două variante de amplificatoare au următoarele relații de calcul:

- amplificarea în tensiune: $A_V = -g_m \cdot R_C$
- rezistența de intrare: $R_i = r_\pi \parallel R_B$ unde simbolul \parallel reprezintă conexiunea paralel
- rezistența de ieșire: $R_o = R_C$
- amplificarea în curent: $A_I = A_V \cdot \frac{R_i}{R_o}$ unde s-au utilizat relațiile de definiție ale

rezistenței de intrare R_i respectiv de ieșire R_o

În relațiile de mai sus, g_m respectiv r_π sunt parametrii de semnal mic ai tranzistorului bipolar, care se determină cu relațiile:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

V_T = tensiunea termică

Observații:

- Semnul “-” din fața relației factorului de amplificare în tensiune indică un defazaj de 180° între tensiunea de ieșire v_o și cea de intrare v_i , iar modulul expresiei indică de câte ori rezultă mai mare amplitudinea V_o a tensiunii de ieșire față de amplitudinea V_i a tensiunii de intrare în amplificator:

$$V_o = |A_V| \cdot V_i$$

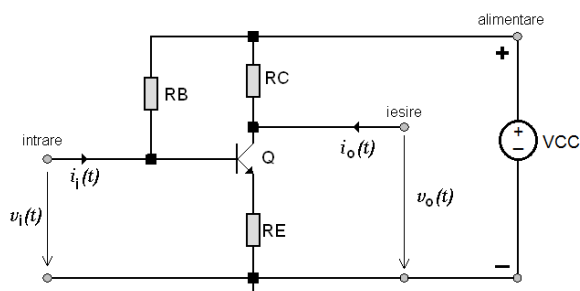
- Semnul “-” din fața relației factorului de amplificare în curent indică un defazaj de 180° între curentul de ieșire i_o și cel de intrare i_i , iar modulul expresiei indică de câte ori rezultă mai mare amplitudinea I_o a curentului de ieșire față de amplitudinea I_i a curentului de intrare în amplificator:

$$I_o = |A_I| \cdot I_i$$

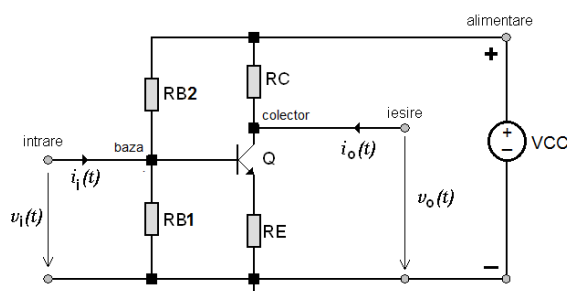
- Deoarece acest amplificator amplifică atât în tensiune cât și în curent, amplificatorul în conexiunea Emitter Comun amplifică în putere.
- Valoarea rezistenței de intrare este medie (sute de ohmi ÷ câțiva kilohmi), și din acest motiv vor exista atât pierderi de tensiune, cât și pierderi de curent, la bornele de intrare ale amplificatorului.
- Valoarea rezistenței de ieșire este medie (sute de ohmi ÷ câțiva kilohmi), și din acest motiv vor exista atât pierderi de tensiune, cât și pierderi de curent, la bornele de ieșire ale amplificatorului.

b. Amplificator cu tranzistor bipolar în conexiunea Emitter Comun, fără condensator în emitor

Cele 2 variante de amplificatoare cu tranzistor bipolar în conexiunea Emitter Comun, fără condensator în emitor, sunt prezentate în Figura 4, în care se specifică și sursa de alimentare V_{CC} .



A. Amplificator cu TB în conexiunea EC cu rezistor în emitor



B. Amplificator cu TB în conexiunea EC cu divizor rezistiv în bază

Figura 4. Amplificatoare cu tranzistoare bipolare în conexiunea Emitter Comun, fără condensator în emitor.

Relațiile de calcul pentru **PSF-ul** tranzistorului bipolar sunt indicate mai jos:

Amplificator cu TB în conexiunea EC
cu rezistor în emitor

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E)$$

Amplificator cu TB în conexiunea EC
cu divizor rezistiv în bază

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B}$$

$$V_{BB} = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC}$$

$$R_B = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E)$$

Se reamintește faptul că tranzistorul bipolar funcționează în RAN dacă este satisfăcută condiția:

$$0,5[V] < V_{CE} < V_{CC} - 0,5[V]$$

Parametrii de semnal mic a celor două variante de amplificatoare au următoarele relații de calcul:

- amplificarea în tensiune:

$$A_V = -\frac{\beta \cdot R_C}{r_\pi + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

- amplificarea în curent:

$$A_I = A_V \cdot \frac{R_i}{R_o}$$

- rezistența de intrare:

$$R_i = \frac{R_B \cdot [r_\pi + (\beta + 1) \cdot R_E]}{R_B + r_\pi + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

unde, în cazul amplificatorului cu divizor rezistiv în bază,

relația de calcul a rezistenței R_B este $R_B = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$.

- rezistența de ieșire:

$$R_o = R_C$$

În relațiile de mai sus, g_m respectiv r_π sunt parametrii de semnal mic ai tranzistorului bipolar, care se determină cu relațiile:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

V_T = tensiunea termică

Observații:

- Semnul “-” din fața relației factorului de amplificare în tensiune indică un defazaj de 180° între tensiunea de ieșire v_o și cea de intrare v_i , iar modulul expresiei indică de câte ori rezultă mai mare amplitudinea V_o a tensiunii de ieșire față de amplitudinea V_i a tensiunii de intrare în amplificator:

$$V_o = |A_V| \cdot V_i$$

- Semnul “-” din fața relației factorului de amplificare în curent indică un defazaj de 180° între curentul de ieșire i_o și cel de intrare i_i , iar modulul expresiei indică de câte ori rezultă mai

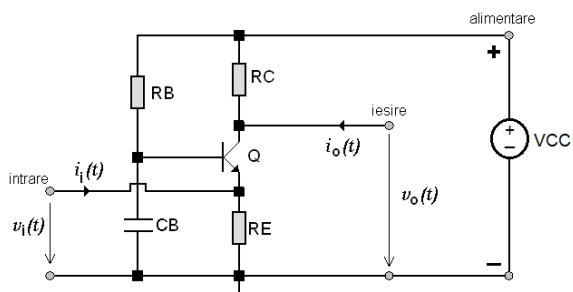
mare amplitudinea I_o a curentului de ieșire față de amplitudinea I_i a curentului de intrare în amplificator:

$$I_o = |A_I| \cdot I_i$$

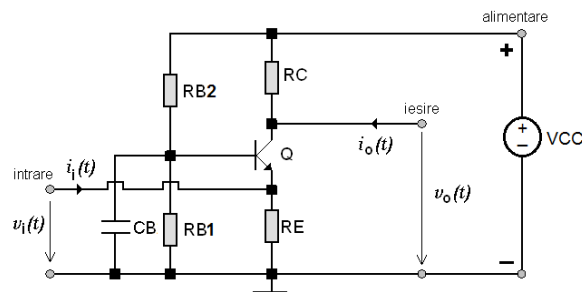
- Deoarece acest amplificator amplifică atât în tensiune cât și în curent, amplificatorul în conexiunea Emitor Comun amplifică în putere.
- Valoarea rezistenței de intrare este mare (zeci kilohmi), și din acest motiv pierderile de tensiune vor fi neglijabile, dar pierderile de curent vor fi semnificative, la bornele de intrare ale amplificatorului.
- Valoarea rezistenței de ieșire este medie (sute de ohmi ÷ câțiva kilohmi), și din acest motiv vor exista atât pierderi de tensiune, cât și pierderi de curent, la bornele de ieșire ale amplificatorului.

2. Amplificatoare cu tranzistoare bipolare în conexiunea Bază Comună – amplificator în tensiune

Cele 2 variante de amplificatoare cu tranzistor bipolar (TB) în conexiunea Bază Comună (BC) sunt prezentate în Figura 5, în care se specifică și sursa de alimentare V_{CC} .



A. Amplificator cu TB în conexiunea BC
cu rezistor în emitor



B. Amplificator cu TB în conexiunea BC
cu divizor rezistiv în bază

Figura 5. Amplificatoare cu tranzistoare bipolare în conexiunea Bază Comună.

Relațiile de calcul pentru **PSF-ul** tranzistorului bipolar sunt indicate mai jos:

Amplificator cu TB în conexiunea BC
cu rezistor în emitor

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E)$$

Amplificator cu TB în conexiunea BC
cu divizor rezistiv în bază

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B}$$

$$V_{BB} = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC}$$

$$R_B = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E)$$

Se reamintește faptul că tranzistorul bipolar funcționează în RAN dacă este satisfăcută condiția:

$$0,5[V] < V_{CE} < V_{CC} - 0,5[V]$$

Parametrii de semnal mic a celor două variante de amplificatoare au următoarele relații de calcul:

- amplificarea în tensiune: $A_V = g_m \cdot R_C$
- amplificarea în curent: $A_I = A_V \cdot \frac{R_i}{R_o} < 1$
- rezistența de intrare: $R_i = \frac{r_\pi}{1 + \beta}$
- rezistența de ieșire: $R_o = R_C$

În relațiile de mai sus, g_m respectiv r_π sunt parametrii de semnal mic ai tranzistorului bipolar, care se determină cu relațiile:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

V_T = tensiunea termică

Observații:

- Semnul “+” din fața relației factorului de amplificare în tensiune indică un defazaj de 0° între tensiunea de ieșire v_o și cea de intrare v_i , iar modulul expresiei indică de câte ori rezultă mai mare amplitudinea V_o a tensiunii de ieșire față de amplitudinea V_i a tensiunii de intrare în amplificator:

$$V_o = |A_V| \cdot V_i$$

- Semnul “+” din fața relației factorului de amplificare în curent indică un defazaj de 0° între curentul de ieșire i_o și cel de intrare i_i , iar modulul expresiei, care este egal cu **1**, indică faptul că acest tip de amplificator **nu** amplifică în curent, amplitudinile curenților fiind egale:

$$I_o = I_i$$

- Valoarea rezistenței de intrare este mică (sute de ohmi), și din acest motiv vor exista pierderi mari de tensiune la bornele de intrare ale amplificatorului.
- Valoarea rezistenței de ieșire este medie (sute de ohmi ÷ câțiva kilohmi), și din acest motiv vor exista pierderi de tensiune la bornele de ieșire ale amplificatorului.

3. Amplificatoare cu tranzistoare bipolare în conexiunea Colector Comun – amplificator în curent

Cele 2 variante de amplificatoare cu tranzistor bipolar (TB) în conexiunea Colector Comun (CC) sunt prezentate în Figura 6, în care se specifică și sursa de alimentare V_{CC} .

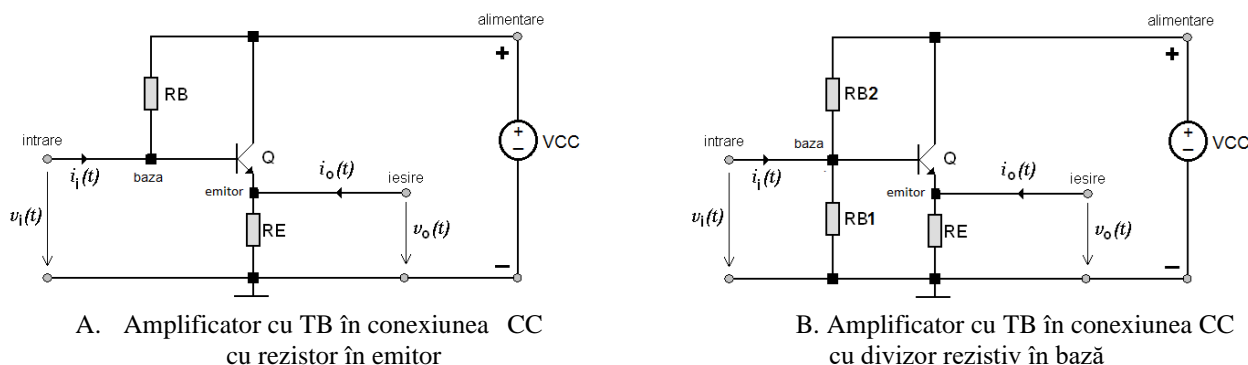


Figura 6. Amplificatoare cu tranzistoare bipolare în conexiunea Colector Comun.

Relațiile de calcul pentru **PSF-ul** tranzistorului bipolar sunt indicate mai jos:

Amplificator cu TB în conexiunea CC
cu rezistor în emitor

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_E$$

Amplificator cu TB în conexiunea CC
cu divizor rezistiv în bază

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B}$$

$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC}$$

$$R_B = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_E$$

Se reamintește faptul că tranzistorul bipolar funcționează în RAN dacă este satisfăcută condiția:

$$0,5[V] < V_{CE} < V_{CC} - 0,5[V]$$

Parametrii de semnal mic a celor două variante de amplificatoare au următoarele relații de calcul:

- amplificarea în tensiune: $A_V = \frac{(1 + \beta) \cdot R_B}{r_\pi + (1 + \beta) \cdot R_B} < 1$
- amplificarea în curent: $A_I = A_V \cdot \frac{R_i}{R_o}$
- rezistența de intrare: $R_i = \frac{R_B \cdot [r_\pi + (1 + \beta) \cdot R_E]}{R_B + r_\pi + (1 + \beta) \cdot R_E}$
- rezistența de ieșire: $R_o = \frac{r_\pi \cdot R_E}{r_\pi + (\beta + 1) \cdot R_E}$

În relațiile de mai sus, g_m respectiv r_π sunt parametrii de semnal mic ai tranzistorului bipolar, care se determină cu relațiile:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

V_T = tensiunea termică

Observații:

- Semnul “+” din fața relației factorului de amplificare în tensiune indică un defazaj de 0° între tensiunea de ieșire v_o și cea de intrare v_i , iar modulul expresiei, care este egal cu **1**, indică faptul că acest tip de amplificator nu amplifică în tensiune, amplitudinile tensiunilor fiind egale; datorită faptului că tensiunea de ieșire este identică cu cea de intrare, acest circuit se mai numește și repetor pe emitor:

$$V_o = V_i$$

- Semnul “+” din fața relației factorului de amplificare în curent indică un defazaj de 0° între curentul de ieșire i_o și cel de intrare i_i , iar modulul expresiei indică de câte ori rezultă mai mare amplitudinea I_o a curentului de ieșire față de amplitudinea I_i a curentului de intrare în amplificator:

$$I_o = |A_I| \cdot I_i$$

- Valoarea rezistenței de intrare este mare (zeci de kilohmi), și din acest motiv pierderile de tensiune la bornele de intrare ale amplificatorului sunt neglijabile.
- Valoarea rezistenței de ieșire este mică (zeci de ohmi), și din acest motiv pierderile de tensiune la bornele de ieșire ale amplificatorului sunt neglijabile.

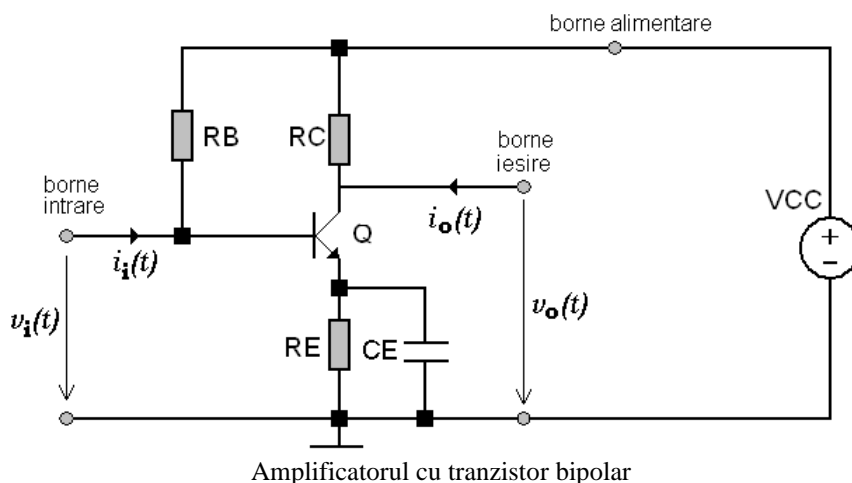
II. Analiza amplificatoarelor de semnal mic cu tranzistoare, în banda de frecvență

În continuare se prezintă metoda prin care se realizează analiza amplificatoarelor de semnal mic cu tranzistoare bipolare; scopul analizei constă în determinarea punctului static de funcționare al acestuia, precum și a expresiilor matematice ale parametrilor de semnal mic ai amplificatorului considerat.

Metoda prezentată se bazează pe deducerea unor circuite de calcul, pornind de la schema electronică a amplificatorului considerat, care sunt utilizate pentru determinarea parametrilor de interes. Metoda prezentată este valabilă indiferent de schema electronică a amplificatorului și este utilizată pentru deducerea expresiilor matematice pentru parametrii tuturor amplificatoarelor de semnal mic prezentate anterior.

Exemplu de analiză a unui amplificator de semnal mic cu tranzistor bipolar

Se consideră schema electronică a amplificatorului de semnal mic, cu tranzistor bipolar în conexiunea Emitter Comun, cu condensator în emitor, din figura de mai jos.



Amplificatorul cu tranzistor bipolar

Mărimile electrice din schema electronică a amplificatorului considerat au următoarele semnificații:

semnale de intrare:

- $v_i(t)$ reprezintă tensiunea de intrare în amplificator;
- $i_i(t)$ reprezintă curentul de intrare în amplificator;

semnale de ieșire:

- $v_o(t)$ reprezintă tensiunea de ieșire din amplificator;
- $i_o(t)$ reprezintă curentul de ieșire din amplificator.

Semnalele de intrare provin de la un generator de semnal, care se aplică la bornele de intrare ale amplificatorului, în general prin intermediul unui condensator de capacitate electrică mare (zeci de microfarazi). Aceste semnale sunt semnalele de amplificat.

Semnalele de ieșire sunt furnizate pe o sarcină, care poate fi sau o simplă rezistență electrică, sau un circuit electronic. Semnalele de ieșire reprezintă rezultatul prelucrării de către amplificator a semnalelor de intrare și sunt semnalele amplificate. Sarcina pe care sunt furnizate aceste semnale este conectată la bornele de ieșire ale amplificatorului, în general la amplificator prin intermediul unui condensator de capacitate electrică mare (zeci de microfarazi)..

Semnalele descrise mai sus sunt utilizate pentru reprezentarea informației care urmează a fi prelucrată (prelucrată = amplificată) de către amplificator. Întotdeauna, pentru ca circuitul electronic să fie capabil să prelucreze informația respectivă, este necesar ca acesta să dispună de o sursă de energie electrică. Pentru amplificator, sursa de energie electrică este reprezentată de către sursa de alimentare (care este o sursă de tensiune continuă), care se conectează la bornele de alimentare ale amplificatorului.

Rolul componentelor electronice ale amplificatorului este următorul:

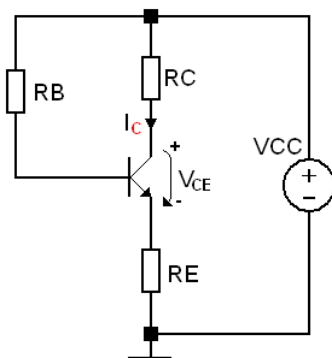
- sursa de alimentare V_{CC} furnizează energie electrică circuitului; datorită acestei surse, prin circuit iau naștere tensiuni continue și curenți continui; în cazul în care este necesară determinarea valorilor numerice ale acestor mărimi, este necesară analizarea funcționării circuitului electronic în regim de curent continuu;
- tranzistorul Q amplifică semnalele de intrare;
- rezistențele R_B , R_E , R_C , împreună cu sursa de alimentare V_{CC} stabilesc PSF-ul tranzistorului Q (perechea de mărimi electrice continue I_C și V_{CE}); pentru buna funcționare a circuitului, este necesar ca tranzistorul bipolar Q să funcționeze în Regiunea Activă Normală = RAN;
- condensatorul C_E , de capacitate electrică cel puțin de ordinul zecilor de microfarazi, conectează în regim variabil emitorul tranzistorului la masa amplificatorului, în scopul creșterii amplificării în tensiune a circuitului. În cazul în care este necesară determinarea valorilor numerice ale acestor mărimi, este necesară analizarea funcționării circuitului electronic în regim de curent continuu;

Generatorul de semnal, care nu este reprezentat în schema electronică a amplificatorului, determină variația mărimilor electrice ale circuitului în jurul valorilor continue ale acestora, stabilite de către sursa de alimentare V_{CC} . Pentru determinarea acestor variații, este necesară analizarea funcționării circuitului electronic în regim variabil.

a. Analiza funcționării circuitului în regim de curent continuu.

Scop: determinarea valorilor numerice ale componentelor continue ale mărimilor electrice. În cazul tranzistorului, analiza funcționării circuitului în regim de curent continuu permite determinarea PSFului acestuia.

În scopul determinării PSFului tranzistorului Q , mai întâi se determină schema electronică a circuitului de polarizare al tranzistorului Q . Determinarea circuitului de polarizare al tranzistorului Q este realizată eliminând din schema electronică a amplificatorului (Figura 12), ramurile de circuit care conțin condensatoare, deoarece condensatoarele nu permit trecerea curentului continuu. După aplicarea acestor modificări asupra schemei electronice a amplificatorului, rezultă circuitul de polarizare al tranzistorului bipolar Q , care, pentru exemplul de amplificator considerat, arată ca în figura de mai jos:



Circuitul de polarizare al tranzistorului bipolar Q .

Circuitul de polarizare rezultat în figura de mai sus este circuitul de polarizare cu rezistență în emitor, analizat în cadrul paragrafului în care s-a prezentat polarizarea tranzistorului bipolar. Din acest motiv, PSF-ul tranzistorului este determinat utilizând următoarele relații, deduse anterior pentru acest circuit de polarizare:

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E)$$

Se reamintește faptul că tranzistorul bipolar funcționează în RAN dacă este satisfăcută condiția:

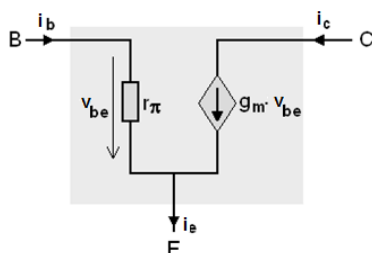
$$0,5[V] < V_{CE} < V_{CC} - 0,5[V]$$

b. Analiza funcționării amplificatorului în regim variabil de semnal mic, în banda de frecvență a amplificatorului

Scop: calcularea parametrilor amplificatorului: valoare factor de amplificare, rezistență de intrare, rezistență de ieșire.

Determinarea circuitului echivalent în regim variabil de semnal mic al amplificatorului este realizată prin aplicarea în schema electronică a amplificatorului a următoarelor reguli:

1. condensatoarele de capacități mari (mai mari decât aproximativ **1[μF]**) se înlocuiesc cu un scurtcircuit (fir) aplicat între terminale;
2. se pasivizează sursa de alimentare; în exemplul considerat, sursa de alimentare este sursa de tensiune continuă $V_{CC} \Rightarrow$ prin pasivizarea sa, sursa de tensiune continuă V_{CC} se înlocuiește cu un scurtcircuit (fir) aplicat între cele 2 bornele ale sale;
3. tranzistorul bipolar se înlocuiește cu circuitul echivalent de semnal mic, valabil pentru domeniul de frecvențe medii; în figura de mai jos se reamintește circuitul echivalent al tranzistorului bipolar, valabil în regim variabil de semnal mic, în domeniul frecvențelor medii și joase.



Circuitul echivalent al tranzistorului bipolar, valabil în regim variabil de semnal mic, în domeniul frecvențelor medii și joase.

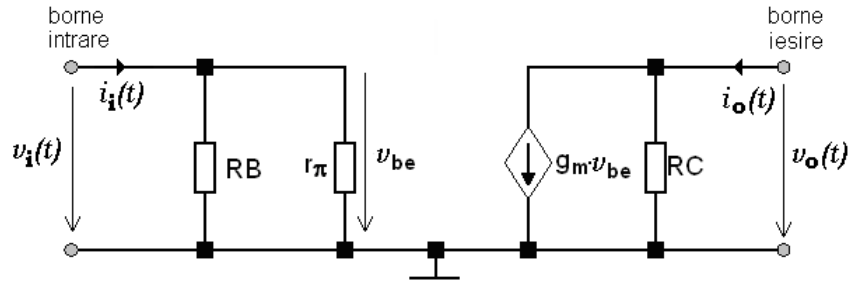
În circuitul echivalent al tranzistorului bipolar, parametrul g_m (denumit panta tranzistorului) și r_π (rezistența de semnal mic a joncțiunii pn dintre bază și emitor) reprezintă parametrii de semnal mic ai tranzistorului bipolar se determină cu relațiile de mai jos:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

În relația de calcul a parametrului g_m , curentul I_C este curentul din PSF al tranzistorului bipolar. Rezultă că valorile parametrilor de semnal mic ai tranzistorului bipolar depind de PSF-ul acestuia, de unde, în continuare rezultă că parametrii de semnal mic ai amplificatorului (cei care urmează a fi calculați) depind de modul în care este polarizat tranzistorul bipolar. De aici, rezultă o dată în plus importanța polarizării tranzistorului bipolar.

După aplicarea modificărilor amintite mai sus, rezultă circuitul echivalent din figura de mai jos, în care se remarcă dispariția rezistorului R_E din emitorul tranzistorului. Acest fapt este datorat înlocuirii, în regim variabil, a condensatorului C_E cu un scurtcircuit, care în continuare scurtcircuituează rezistorul R_E (deoarece este conectat în paralel cu acesta) și în consecință R_E nu mai are nici un rol în circuit (curentul nu mai trece prin acesta, ci trece în totalitate prin scurtcircuitul

generat de către C_E) și din acest motiv R_E este eliminat din circuit. Se constată astfel că în regim variabil emitorul tranzistorului devine conectat (cuplat) la masa circuitului



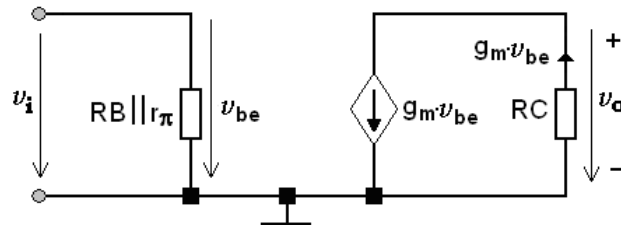
Circuitul echivalent al amplificatorului în regim variabil de semnal mic.

Determinarea expresiei matematice a factorului de amplificare în tensiune

Prin definiție, factorul de amplificare în tensiune al amplificatorului, se determină pe baza formulei de mai jos,

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{i_o=0}$$

Condiția $i_o=0$ din relația de definiție indică faptul că bornele de ieșire ale amplificatorului sunt lăsate în gol (de unde și curentul de ieșire nul). Circuitul inițial de calcul poate fi redesenat ca în figura de mai jos, în care s-a ținut cont că R_B și r_π , conectate în paralel (notația $R_B || r_\pi$ reprezintă rezistența echivalentă a celor 2 rezistoare), iar ieșirile sunt în gol.



Circuitul de calcul pentru factorul de amplificare în tensiune

Pentru determinarea expresiei matematice a factorului de amplificare în tensiune, se exprimă ambele mărimi implicate în raportul din definiția acestuia, și anume v_o și v_i , în funcție de o necunoscută comună și de elementele circuitului. Necunoscuta comună, în funcție de care se exprimă v_o și v_i este v_{be} .

Tensiunea v_o se determină în funcție de v_{be} , aplicând legea lui Ohm pe rezistorul R_C . În condițiile în care curentul i_o este egal cu zero, curentul care trece prin rezistența R_C este chiar cel generat de generatorul de curent comandat și are valoarea $g_m \cdot v_{be}$. Totodată, se remarcă faptul că acest curent are sens invers prin rezistența R_C , față de referința considerată pentru tensiunea v_o . Rezultă:

$$v_o = -g_m \cdot v_{be} \cdot R_C$$

Tensiunea v_i se determină în funcție de v_{be} observând că acestea sunt egale:

$$v_i = v_{be}$$

Înlocuind rezultatele de mai sus în relația de definiție, necunoscuta v_{be} se simplifică, iar expresia matematică a factorului de amplificare în tensiune a amplificatorului devine:

$$A_V = -g_m \cdot R_C$$

expresia matematică a factorului de amplificare în tensiune

Semnul “-” din fața relației de mai sus indică un defazaj de 180^0 între tensiunea de ieșire v_o și cea de intrare v_i , iar modulul expresiei indică de câte ori rezultă mai mare amplitudinea V_o a tensiunii de ieșire față de amplitudinea V_i a tensiunii de intrare în amplificator, fiind cel puțin de ordinul zecilor.

Determinarea expresiei matematice a R_i de intrare a amplificatorului

Rezistența de intrare R_i este rezistența determinată între bornele de intrare ale amplificatorului, și se definește sub forma următorului raport:

$$R_i = \frac{v_i}{i_i}$$

Pentru determinarea expresiei matematice a rezistenței de intrare, se exprimă ambele mărimi implicate în raportul din definiția acestuia, și anume v_i și i_i , în funcție de o necunoscută comună și de elementele circuitului. Necunoscuta comună, în funcție de care se exprimă v_i și i_i este v_{be} .

Tensiunea v_i în funcție de v_{be} se determină aplicând TK2 pe bucla compusă din sursa v_i și rezistența $R_B || r_\pi$:

$$-v_i + v_{be} = 0 \Rightarrow v_i = v_{be} \Rightarrow V_i = V_{be}$$

Curentul i_i în funcție de v_{be} se determină aplicând relația de calcul pentru curentul i_b , observând mai întâi că rezistențele R_B și r_π formează un divizor de curent pentru curentul i_i și apoi aplicând legea lui Ohm pentru rezistența r_π :

$$i_b = \frac{R_B}{R_B + r_\pi} \cdot i_i = 0 \quad i_b = \frac{v_{be}}{r_\pi} \Rightarrow i_i = \frac{R_B \cdot r_\pi}{R_B + r_\pi} \cdot v_{be}$$

Înlocuind rezultatele de mai sus în relația de definiție a rezistenței de intrare, necunoscuta V_{be} se simplifică, iar expresia matematică a rezistenței de intrare este:

$$R_i = \frac{R_B \cdot r_\pi}{R_B + r_\pi}$$

Pentru a asigura funcționarea tranzistorului bipolar în RAN se poate demonstra foarte ușor că este necesar ca cele 2 rezistențe implicate în calculul lui R_i să satisfacă următoarea condiție:

$$R_B \gg r_\pi$$

Ținând cont de această condiție, relația de calcul a rezistenței de intrare în amplificator devine:

$$R_i \cong r_\pi$$

Rezistența de intrare

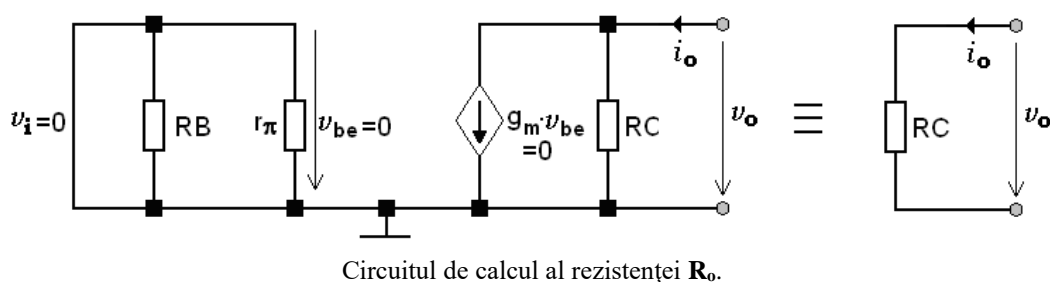
Deoarece pentru curenți I_C în domeniul de valori care corespunde funcționării tranzistorului bipolar în RAN, rezistența r_π este cel mult de ordinul a câțiva kilohmi, rezultă că valoarea rezistenței de intrare în amplificator este destul de mică pentru cazul în care informația este reprezentată în tensiune, respectiv destul de mare pentru cazul în care informația este reprezentată în curent și din aceste motive este de așteptat să existe pierderi de semnal la intrarea amplificatorului.

Determinarea expresiei matematice a R_o de ieșire a amplificatorului

Rezistența de ieșire R_o este rezistența măsurată (calculată) între bornele de ieșire ale amplificatorului iar relația sa de calcul se definește astfel:

$$R_o = \left. \frac{v_o}{i_o} \right|_{v_i=0}$$

unde, condiția $v_i=0$ indică faptul că acest calcul se efectuează în condițiile în care bornele de intrare sunt scurtcircuitate (de unde și anularea valorii tensiunii de intrare). Datorită anulării tensiunii de intrare, circuitul de calcul al rezistenței de ieșire suferă o serie de modificări față de circuitul inițial de calcul: tensiunea v_{be} devine egală cu zero volți \Rightarrow curentul generat de generatorul comandat devine la rândul său zero amperi (curentul are valoarea $g_m \times v_{be}$), și în final, circuitul de calcul al rezistenței R_o devine cel din figura din dreapta:



Aplicând TK2 pe bucla compusă din R_C și v_o rezultă:

$$-v_o + R_C \cdot i_o = 0$$

relație care este valabilă și pentru amplitudinile variațiilor v_o și i_o , de unde rezultă expresia matematică a rezistenței de ieșire a amplificatorului:

$$R_o = R_C$$

Rezistența de ieșire

Determinarea expresiei matematice a factorului de amplificare în curent

Prin definiție, factorul de amplificare în curent a amplificatorului se determină pe baza formulei:

$$A_I = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{v_o=0}$$

Condiția $v_o=0$ din relația de definiție indică faptul că bornele de ieșire ale amplificatorului sunt scurtcircuitate (de unde și tensiunea de ieșire nulă).

Calcul expresiei matematice a factorului de amplificare în curent se poate simplifica dacă se utilizează relațiile de definiție ale rezistenței de intrare, respectiv de ieșire ale amplificatorului:

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \qquad R_o = \left. \frac{v_o}{i_o} \right|_{v_i=0}$$

Din care se deduc expresiile pentru curenții electrici implicați în raportul care definește factorul de amplificare în curent:

$$i_i = \frac{v_i}{R_i} \qquad i_o = \frac{v_o}{R_o}$$

Introducând expresiile de mai sus ale curenților electrici în definiția factorului de amplificare în curent, rezultă:

$$A_I = \frac{\frac{v_o}{R_o}}{\frac{v_i}{R_i}} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{R_i}{R_o} = A_V \cdot \frac{R_i}{R_o} \qquad A_I \cong -g_m \cdot R_C \cdot \frac{r_\pi}{R_C} = -g_m \cdot \underbrace{r_\pi}_{\beta} = -\beta$$

$$A_I \cong -\beta$$

expresia matematică a factorului de amplificare în curent

III. Modelarea comportamentului amplificatoarelor în regim variabil de semnal mic

După determinarea expresiilor matematice ale parametrilor de semnal mic ai amplificatoarelor, comportamentul acestora în regim variabil de semnal mic se poate modela cu ajutorul circuitelor care descriu amplificatoarele liniare, prezentate în cursul precedent. Aceste modele sunt utile atunci când este necesară determinarea expresiei matematice a factorului de amplificare, în condițiile în care un amplificator este conectat la circuitele externe.

În continuare, se prezintă ca exemplu cazul amplificatorului de semnal mic cu tranzistor bipolar în conexiunea Emitter Comun, cu condensator în emitor. Modul în care este conectat acesta la circuitele externe este prezentat în Figura 13.

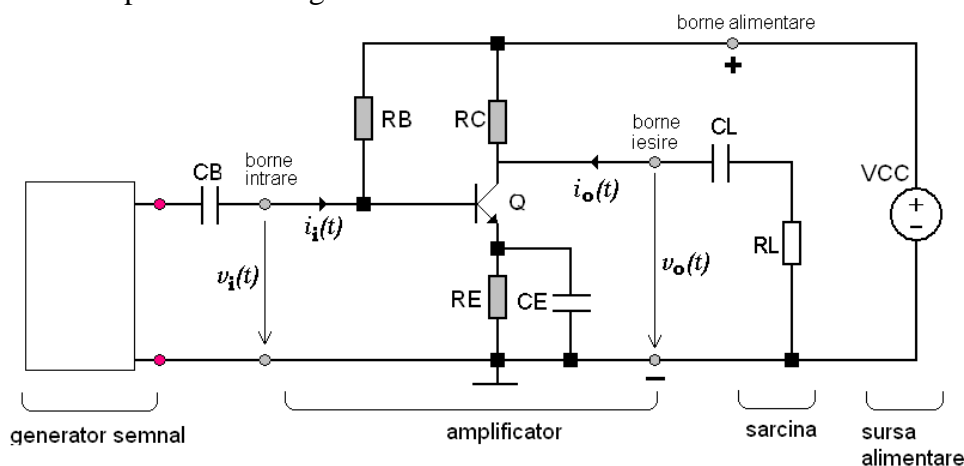


Figura 13. Conectarea la circuitele externe a unui circuit de amplificare.

Generatorul de semnal furnizează amplificatorului informația, reprezentată sub forma unei mărimi electrice (tensiune sau curent) variabile în timp; datorită generatorului de semnal, prin circuit iau naștere tensiuni variabile și curenți variabili, a căror variație este axată pe tensiunile continue, respectiv curenții continui stabiliți de către sursa de alimentare V_{CC} ; pentru ca amplificatorul să se comporte liniar, este necesar ca variațiile acestor mărimi electrice să fie suficient de mici încât tranzistorul bipolar să lucreze în regim de semnal mic; în cazul în care este necesară determinarea valorilor numerice ale mărimilor electrice variabile, este necesară analiza funcționării circuitului electronic în regim variabil de semnal mic;

Condensatoarele C_B și C_L , de capacitate electrică cel puțin de ordinul zecilor de microfarazi, izolează în regim de curent continuu amplificatorul de circuitele externe, în scopul menținerii nemodificate a valorii PSFului tranzistorului bipolar și implicit a regiunii de funcționare a acestuia, la conectarea la amplificator a circuitelor externe; cuplarea circuitelor externe la amplificator se realizează numai în regim variabil, când condensatoarele se comportă ca scurtcircuite.

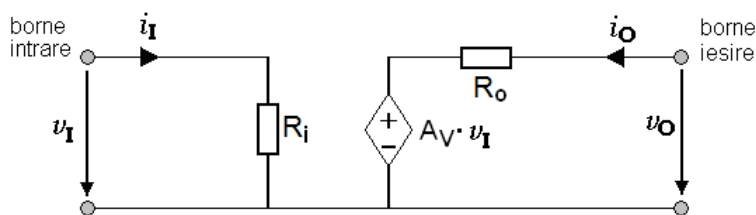
În regim de curent continuu, se remarcă faptul că generatorul de semnal și sarcina amplificatorului nu influențează regimul de funcționare al tranzistorului Q , datorită condensatoarelor

C_B și C_L . În acest mod, se evită modificarea PSF-ului tranzistorului Q în momentul conectării circuitelor externe la amplificator (această modificare este cauzată de către mărimile electrice continue ale circuitelor externe). Este obligatoriu ca valoarea PSF-ului tranzistorului Q să nu depindă de circuitele externe ale amplificatorului, deoarece, în caz contrar, există riscul ca tranzistorul amplificatorului să nu mai funcționeze în RAN după conectarea circuitelor externe la amplificator. Pentru a evita această situație, PSF-ul tranzistorului trebuie să depindă numai de circuitul său de polarizare, pentru că astfel, prin proiectarea corectă a acestuia, se asigură funcționarea corectă a tranzistorului (în RAN), indiferent de structura circuitelor externe.

În continuare, se prezintă modul în care se poate modela comportamentul unui amplificator în regim variabil de semnal mic, atunci când informația de interes este reprezentată prin intermediul tensiunii electrice, respectiv a curentului electric.

1. Echivalarea amplificatorului de semnal mic cu un amplificator liniar de tensiune

În cazul în care se consideră că informația amplificată de către amplificatorul considerat este reprezentată prin intermediul tensiunii electrice, schema electrică a amplificatorului poate fi modelată prin intermediul circuitului echivalent al amplificatorului liniar de tensiune, prezentat în figura de mai jos, în care parametrii modelului, A_V , R_i și R_o sunt particularizați în funcție de expresiile matematice ale acestor parametri, valabile pentru amplificatorul considerat.



Modelul amplificatorului liniar de tensiune

Circuitul astfel obținut, modelează comportamentul amplificatorului considerat în regim variabil de semnal mic.

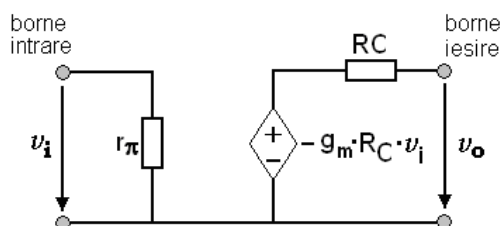
De exemplu, în cazul amplificatorului de semnal mic cu tranzistor bipolar în conexiunea emitor comun, cu condensator în emitor, expresiile matematice ale acestor parametri sunt:

$$A_V = -g_m \cdot R_C$$

$$R_i = r_\pi$$

$$R_o = R_C$$

În aceste condiții, comportamentul în regim variabil de semnal mic, în banda sa de frecvență a amplificatorului prezentat, poate fi modelat prin intermediul circuitului echivalent indicat mai jos:



Modelarea amplificatorului cu tranzistor bipolar în conexiunea Emitor Comun, cu condensator în emitor, ca amplificator liniar de tensiune

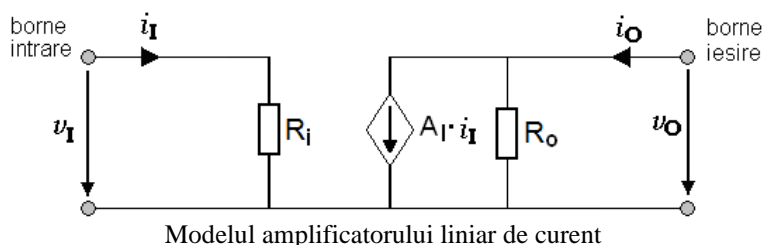
Pe baza acestui circuit echivalent, conform procedurii de calcul prezentate în cursul precedent în paragraful dedicat calculului expresiei matematice a amplificării reale în tensiune A_{Vg} , obținute în condițiile în care amplificatorul este conectat la circuitele externe (generatorul de tensiune și sarcină), valoarea reală a amplificării în tensiune A_{Vg} devine:

$$A_{Vg} = -g_m \cdot R_C \cdot \left(\frac{r_\pi}{R_g + r_\pi} \right) \cdot \left(\frac{R_L}{R_C + R_L} \right)$$

valoarea reală a factorului de amplificare în tensiune

2. Echivalarea amplificatorului de semnal mic cu un amplificator liniar de curent

În cazul în care se consideră că informația amplificată de către amplificatorul considerat este reprezentată prin intermediul curentului electric, schema electrică a amplificatorului poate fi modelată prin intermediul circuitului echivalent al amplificatorului liniar de curent, prezentat în figura de mai jos, în care parametrii modelului, A_I , R_i și R_o sunt particularizați în funcție de expresiile matematice ale acestora, valabile pentru amplificatorul considerat.



Circuitul astfel obținut, modelează comportamentul amplificatorului considerat în regim variabil de semnal mic.

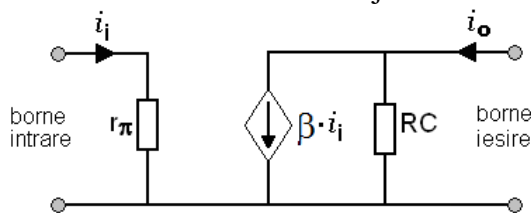
De exemplu, în cazul amplificatorului de semnal mic cu tranzistor bipolar în conexiunea Emitter Comun, cu condensator în emitor, expresiile matematice ale acestor parametri sunt:

$$A_I = -\beta$$

$$R_i = r_\pi$$

$$R_o = R_C$$

În aceste condiții, comportamentul în banda sa de frecvență a amplificatorului prezentat poate fi modelat prin intermediul circuitului echivalent indicat mai jos:



Modelarea amplificatorului cu tranzistor bipolar în conexiunea Emitter Comun, cu condensator în emitor, ca amplificator liniar de curent

Pe baza acestui circuit echivalent, conform procedurii de calcul prezentate în cursul precedent în paragraful dedicat calculului expresiei matematice a amplificării reale în curent A_{Ig} , obținute în condițiile în care amplificatorul este conectat la circuitele externe (generatorul de tensiune și sarcină), valoarea reală a amplificării în curent A_{Ig} devine:

$$A_{Ig} = -\beta \cdot \left(\frac{R_g}{R_g + r_\pi} \right) \cdot \left(\frac{R_C}{R_C + R_L} \right)$$

valoarea reală a factorului de amplificare în curent